

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа Неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки Приборостроение  
Отделение Контроля и диагностики

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ОБРАЗЦЫ ГОРНЫХ ПОРОД СЛОИСТОЙ ТЕКСТУРЫ</b>	

УДК 552.1-047.37:53

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6Б	Каргина Елена Андреевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. ИШФВП	Беспалько А. А.	к.ф.-м.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Данков А. Г.	к.и.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОКД	Анищенко Ю. В.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Приборостроение	Вавилова Г.В..	к.т.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
P1	Применять навыки эффективной индивидуальной и командной работы, включая руководство командой, работу по междисциплинарной тематике с учетом этики и корпоративных интересов, в том числе и на иностранном языке.	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК- 1, ОПК-3, ПК-12, ПК-16, ПК-17, ПК-18, ПК-22), СУОС ТПУ (УК-1, УК-3, УК-4, УК-5, УК-6), CDIO Syllabus (2.1, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1), Критерий 5 АИОР (п. 2.2, п. 2.3, п. 2.4, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158. Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса, 19.032 Специалист по диагностике газотранспортного оборудования, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами)
P2	Применять навыки управления разработкой и производством продукции на всех этапах ее жизненного цикла с учетом инновационных рисков коммерциализации проектов, в том числе в нестандартных ситуациях.	Требования ФГОС (ОК-1, ОК-2, ОК-3, ОПК-1, ПК-6, ПК-8, ПК-16, ПК-18, ПК-19, ПК-20), СУОС ТПУ (УК-2, УК-6), CDIO Syllabus (2.1, 2.4, 2.5, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.6, 4.7, 4.8), Критерий 5 АИОР (п. 2.1, п. 2.3, п. 2.5, п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник, 29.006 Специалист по проектированию систем в корпусе, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)
P3	Собирать, хранить, обрабатывать, использовать, представлять и защищать информацию при соблюдении требования информационной безопасности и корпоративной культуры.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-4, ПК-17, ПК-19), СУОС ТПУ (УК-5, УК-6), CDIO Syllabus (1.1, 2.2), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI ,

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
		требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса)
Р4	Применять навыки планирования, подготовки, проведения теоретических и экспериментальных исследований, а также представления и интерпретации полученных результатов.	Требования ФГОС (ОПК-1, ОПК-2 , ПК-1, ПК-2 , ПК-15, ПК-17), СУОС ТПУ (УК-1), Критерий 5 АИОР (п 1.1, п.1.2, п.1.4), CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 4.3), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 40.008 Специалист по организации и управлению научно-исследовательскими и опытно-конструкторскими работами)
Р5	Разрабатывать нормативную, техническую и методическую документацию в области неразрушающего контроля и измерительной техники.	Требования ФГОС (ПК-3, ПК-9 , ПК-11, ПК-17), CDIO Syllabus (1.2, 4.4), Критерий 5 АИОР (п.1.3, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-радиоэлектроник)
Р6	Быть готовым к комплексной профессиональной деятельности при разработке инновационных и эффективных методов и средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (ПК-5, ПК-6, ПК-8, ПК- 10, ПК-11, ПК-13, ПК-14, ПК-18, ПК-20, ПК-21, ПК-22), СУОС ТПУ (УК-1), CDIO Syllabus (1.2, 1.3, 2.3, 4.1, 4.4, 4.5), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.3, п. 1.4, п.1.5, п. 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.158 Специалист в области контрольно-измерительных приборов и автоматики, 40.108 Специалист по неразрушающему контролю, 06.005 Инженер-

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требование ФГОС ВПО, критериев и/или заинтересованных сторон
		радиоэлектроник, 40.010 Специалист по техническому контролю качества продукции, 40.011 Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам)
Р7	Разрабатывать и внедрять энерго- и ресурсоэффективные технологические процессы производства приборных систем с использованием высокотехнологичных средств измерения и контроля.	Требования ФГОС (ПК-7, ПК-8, ПК-10. ПК- 11, ПК-12, ПК-14, ПК-21), CDIO Syllabus (1.3, 4.1, 4.2, 4.5. 4.6), Критерий 5 АИОР (п. 1.2, п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EURACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (19.026 Специалист по техническому контролю и диагностированию объектов и сооружений нефтегазового комплекса, 19.032 Специалист по диагностике газотранспортного оборудования)

Инженерная школа Неразрушающего контроля и безопасности  
Направление подготовки Приборостроение  
Отделение Контроля и диагностики

Руководитель ООП

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_  
(Дата)      Вавилова Г. В.  
(Ф.И.О.)

В форме:

---

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ6Б	Каргиной Елене Андреевне

Тема работы:

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ  
АКУСТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ОБРАЗЦЫ ГОРНЫХ ПОРОД СЛОИСТОЙ  
ТЕКСТУРЫ

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

## Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объектом исследования являются механоэлектрические преобразования в горные породы, представленные серпентинитом, которые имеют типичную полосчатую текстуру, чередование слоев серпентина и хризотил-асбеста. Образцы серпентинита имели форму параллелепипеда. Размеры в исходном состоянии  $(6 \times 3,5 \times 2,4) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ .

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>К анализу подлежат: литература отечественных и зарубежных исследователей с целью выяснения достижений мировой науки в области механоэлектрических преобразований в горных породах; методик динамического и акустического воздействий на образцы горной породы; обработка сигналов электромагнитной эмиссии и анализ их спектров из образцов горной породы; изучение влияния двойных электрических слоев на параметры электромагнитных сигналов из образцов горной породы при акустическом воздействии.</p>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	<p>Презентация в Microsoft Office PowerPoint 2007</p>

#### Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
<b>Основная часть магистерской диссертации</b>	Беспалько Анатолий Алексеевич
<b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b>	Данков Артем Георгиевич
<b>Социальная ответственность</b>	Анищенко Юлия Владимировна
<b>Часть магистерской диссертации на английском языке</b>	Игна Ольга Николаевна
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Источники и механизмы генерирования электромагнитного сигнала	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

#### Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. ИШФВП	Беспалько Анатолий Алексеевич	к.ф.-м.н.		

#### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6Б	Каргина Елена Андреевна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1БМ6Б	Каргиной Елене Андреевне

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение</b>	<b>Контроля и диагностики</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление подготовки	Приборостроение

### Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</li> <li>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</li> <li>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</li> </ol>	<p>Оценка финансовых и человеческих ресурсов. Работа с информацией, представленной в научных публикациях, аналитических материалах, нормативно-правовых документах, проведение научных исследований.</p>
---	--

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оценка перспективности проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Потенциальные потребители результатов исследования</li> <li>2. Анализ конкурентных технических решений</li> <li>3. Технология QuaD</li> <li>4. SWOT-анализ</li> <li>5. План проекта</li> <li>6. Бюджет научного исследования</li> </ol>
---	---

### Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

### Задание выдал консультант:

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Данков А.С.	К.И.Н.		

### Задание принял к исполнению студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1БМ6Б	Каргина Елена Андреевна		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
1БМ6Б	Каргиной Елене Андреевне

<b>Школа</b>	<b>ИШНКБ</b>	<b>Отделение</b>	<b>Контроля и диагностики</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление подготовки</b>	Приборостроение

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования являются механоэлектрические преобразования в горных породах при динамическом воздействии. Данные исследования в дальнейшем будут применяться для разработки метода мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и прогноза удароопасности.
--	--

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности: 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:	Рабочий процесс проводится в научной лаборатории, где могут быть такие вредные факторы как: повышенный уровень шума и электромагнитных излучений, недостаточная освещенность рабочей зоны. В ходе выполнения работы возможно поражение электрическим током, а также травмы, связанные с острыми краями экспериментальной установки и образцов горной породы.
<b>2. Экологическая безопасность:</b>	В исследованиях используется загрязняющее вещество, как машинное масло в качестве контактного слоя, а также при разрушении образцов горных пород остаются их составляющие.
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможно возникновение пожара.
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	Рациональная планировка рабочей зоны, требования к основным элементам рабочего места: экспериментальная установка, образцы горной породы.

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОКД	Анищенко Ю.В.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
1БМ6Б	Каргина Елена Андреевна		



## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 108 с., 22 рис., 10 табл., 65 источников, 1 прил.

Ключевые слова: механоэлектрические преобразования, электромагнитная эмиссия, напряжённо-деформированное состояние, горные породы.

Объектом исследования являются механоэлектрические преобразования образцов горных пород, представленных серпентинитом.

Цель работы – исследование характеристик механоэлектрических преобразований в горных породах при акустическом воздействии.

В процессе исследования проводились: анализ отечественной и зарубежной литературы, изучение методик динамического и пьезоакустического возбуждения, проведение экспериментов на образцах горной породы.

В результате исследования были проанализированы электромагнитные сигналы, генерируемые при акустическом воздействии на образцы горной породы.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: образцы горной породы имели форму параллелепипеда. Размеры в исходном состоянии  $(6 \times 3,5 \times 2,4) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ .

Степень внедрения: не внедрен, находится на стадии разработки.

Область применения: электроника диэлектриков и полупроводников.

Экономическая эффективность/значимость работы выражается в экономии техники и средств по ее восстановлению при использовании метода мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород и прогноза удароопасности, основанный на явлении механоэлектрических преобразований энергии.

Планируется продолжить исследование механоэлектрических преобразований в горных породах при изменении напряжённо-деформированного состояния.

## Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

ГОСТ 12.2.048–80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.

СП 2.2.1.1312–03 Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий.

СНиП 23–05–95 Естественное и искусственное освещение.

СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

СН 2.2.4/2.1.8.562–96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки.

НПБ 105–03 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**механоэлектрические преобразования:** Появление электромагнитных сигналов в процессе механического и акустического воздействий.

**напряжённо-деформированное состояние:** Совокупность внутренних напряжений и деформаций, возникающих при действии на материальное тело внешних нагрузок, температурных полей и других факторов.

**горная порода:** Агрегат минерала более или менее постоянного состава, образующий самостоятельное геологическое тело.

**амплитудно-частотная характеристики:** Характеризуют электромагнитные сигналы по частоте и амплитуде.

**электромагнитная эмиссия:** Нестационарное изменение потенциала электрического поля в ближней зоне излучения.

**пьезоэлектрические свойства:** Возникновение электрической поляризации под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект) или возникновение деформации под действием электрического поля (обратный пьезоэлектрический эффект) в веществах с определенной кристаллической решеткой.

В данной работе применены следующие обозначения и сокращения:

НДС – напряжённно-деформированное состояние;

ЭМИ – электромагнитное излучение;

ЭМЭ – электромагнитная эмиссия;

ЭМС – электромагнитный сигнал;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

АЭ – акустическая эмиссия;

ПЭП – пьезоакустический приемник;

ЭМД – электромагнитный датчик;

ЧС – чрезвычайная ситуация.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	14
1. Аналитический обзор	16
1.1 Источники и механизмы генерирования электромагнитного сигнала	16
1.2 Возможность оценки параметров электромагнитного сигнала	22
1.3 Связь акустической эмиссии и электромагнитного сигнала	23
1.4 Предпосылки к исследованию двойных электрических слоев в диэлектрических материалах	29
1.5 Постановка задачи	31
2. Описание образцов и методики проведения экспериментов	32
2.1 Петрографическое описание исследуемых образцов	32
2.2 Методика исследования параметров электромагнитных сигналов при динамическом воздействии на образцы	33
2.3 Методика исследования параметров электромагнитных сигналов при пьезоакустическом возбуждении образцов	35
2.4 Методика определения скорости звука в образцах	36
3. Экспериментальная часть	39
3.1 Исследование параметров ЭМС при пьезоакустическом возбуждении образцов серпентинита	39
3.2 Исследование параметров ЭМС при динамическом возбуждении образца серпентинита	49
3.3 Выводы по разделу	52
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	53
4.1 Потенциальные потребители результатов исследования	53
4.2 Анализ конкурентных технических решений	54
4.3 Технология QuaD	57
4.4 SWOT-анализ	60
4.5 План проекта	64
4.6 Бюджет научного исследования	66

5. Социальная ответственность	71
5.1 Производственная безопасность	71
5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований	72
5.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	72
5.2.1 Мероприятия по электробезопасности	74
5.2.2 Мероприятия по выполнению норм естественного и искусственного освещения	75
5.2.3 Мероприятия по борьбе с производственным шумом	76
5.2.4 Мероприятия по обеспечению электромагнитной безопасности	77
5.2.5 Мероприятия по обеспечению безопасности оборудования для работников	78
5.3 Экологическая безопасность	79
5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	79
5.3.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования	79
5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	80
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	80
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при исследовании механоэлектрических преобразований в образцах горной породы	80
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действий в случае возникновения ЧС	81
5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	81
5.5.1 Организационные мероприятия по компоновке рабочей зоны	82
Заключение	84
Список публикаций	86
Список используемых источников	93
Приложение А – Раздел ВКР, выполненный на иностранном языке	94

## **Введение**

Начиная со времени изучения явления механоэлектрических преобразований энергии, основоположником изучения которого является А.А. Воробьев, и к настоящему времени, проведено большое количество исследований не только на горных породах, но и на различных диэлектрических материалах. Определены источники, ответственные за появление электромагнитного сигнала (ЭМС), разработаны механизмы механоэлектрических преобразований и выявлены их основные закономерности. Все эти исследования позволили сделать вывод о применимости явления механоэлектрических преобразований для контроля изменений напряженно-деформированного состояния горных массивов и прогноза геодинамических явлений, таких как горные удары, землетрясения, для контроля сдвижения оползней, а также для определения прочности материалов со сложным структурно-текстурным строением. Широкое использование явления получило также для целей дефектоскопии. На протяжении всего времени изучения механоэлектрических преобразований разрабатывается и совершенствуется аппаратура, регистрирующая различные параметры электромагнитного сигнала, предложены критерии оценки состояния исследуемого объекта по регистрируемым параметрам.

Одним из доступных способов изучения механоэлектрических преобразований в горных породах является физическое моделирование в лабораторных условиях. Это позволило выявить связь между характеристиками механоэлектрических преобразований и объектом исследований.

Физическое моделирование механоэлектрических преобразований в лабораторных условиях проводится с использованием методики акустического возбуждения. Использование этой методики обусловлено тем, что при лабораторных экспериментах на образцах горных пород в процессе их нагружения доказано, что генерация ЭМС возникает уже на первых стадиях нагружения, и сопровождает весь процесс изменения напряженно-деформированного состояния. Регистрируемая при этом акустическая эмиссия

(АЭ), обусловлена развитием и ростом микро- и макротрещин, т.е. процессом трещинообразования. Исследования показали, что излучение электромагнитной энергии является многофакторным процессом, зависящим от физических свойств горных пород, генетического типа и структурно-текстурных особенностей, а также от способа и параметров воздействия на них. Изучение электромагнитной эмиссии горных пород в природных условиях является очень трудоемким и долговременным процессом. Поэтому важным является изучение в лабораторных условиях изменений параметров электромагнитной эмиссии при различных воздействиях, в частности при акустическом возбуждении. Сигналы ЭМЭ наблюдаются при прохождении акустической волны вдоль границ неоднородностей, контактов минеральных зерен или двойных электрических слоев, вследствие появления переменного электрического поля, которое можно зарегистрировать.

В связи с этим целью настоящей работы было исследование изменения параметров электромагнитного сигнала и амплитудно-частотных характеристик при динамическом воздействии на образцы слоистых горных пород.

# 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

## 1.1 Источники и механизмы генерирования электромагнитного сигнала

Со времени исследования механоэлектрических преобразований большое количество работ было посвящено выяснению источников и механизмов генерирования электромагнитного сигнала (ЭМС). В этой проблеме можно выделить два принципиально важных вопроса: 1). Какие процессы приводят к разделению зарядов, образующих электрический диполь, являющийся источником ЭМС. 2). Какие механизмы изменения дипольного момента приводят к формированию ЭМС.

В 1933 году А.В. Степанов обнаружил и исследовал явление возникновения электрического заряда в кристаллах NaCl при пластической деформации в отсутствие внешнего электрического поля. В его работах [1-3] было показано, что знак появляющегося заряда может быть как положительным, так и отрицательным, что после снятия нагрузки заряд исчезает, а повторное нагружение до напряжений выше предела текучести опять вызывает появление заряда. Это явление он объяснил трением слоев кристалла о внутренние неоднородности и процессом образования микротрещин.

Дальнейшие исследования этого явления принадлежат Фишбаху и Новику [4,5]. Они изучили появление электрического заряда при сжатии кристаллов NaCl и впервые связали его появление с движением заряженных дислокаций.

Различные способы деформации щелочно-галогидных кристаллов показали, что заряд возникает на границах напряженных участков тогда, когда внешнее напряжение соответствует пределу текучести, а знак и величина заряда зависят от способа, величины и скорости нагружения, от температуры, концентрации и вида примесей, от структуры самого материала. Многочисленные исследования электризации тел показали, что существует



связь, характеризующая изменение зарядового состояния диэлектрика в зависимости от степени его деформации. Пластическая деформация дает скачок тока в  $10^{10}$  раз по сравнению с его значением в области упругой деформации. Еще более мощные изменения зарядового состояния диэлектрика сопутствуют его раскалыванию.

В начале 70-х годов в Томском политехническом институте под руководством профессора Воробьева А.А., впервые, в лабораторных условиях при механическом воздействии на диэлектрические материалы зафиксированы электромагнитные сигналы (ЭМС) [6]. Причиной ЭМС предполагали переход различных видов энергии в электромагнитную. С тех пор начались работы по исследованию явления механоэлектрических преобразований в диэлектрических материалах, в том числе, в горных породах. Тогда же была высказана гипотеза, согласно которой возникновение и рост трещин должны сопровождаться излучением импульсов электромагнитной природы. Эти работы дали толчок к исследованиям физики процесса ЭМИ. В настоящее время существует около тридцати гипотез возникновения ЭМИ. Согласно одним из них, импульсы ЭМИ могут возникать вследствие эмиссии электронов с берегов растущей трещины [7-9], благодаря неравномерному движению зарядовой мозаики по берегам растущей трещины [10], при нарушении связей двойных электрических слоев вблизи поверхности разрыва. При этом наиболее существенный вклад в ЭМИ вносят заряды, движущиеся с вершиной прорастающей трещины. Известно, что существенный вклад в ЭМИ оказывают движущиеся дислокации при деформировании, например, щелочно-галогенидных кристаллов [11].

В 1981 г. Хатиашвили Н. Г., Перельман М. Е [12] также показали, что образование трещин в твердых телах и разрывов в жидкостях должно сопровождаться генерацией электромагнитного излучения (ЭМИ), существенная доля которого сосредоточена в диапазоне  $10^4 - 10^9$  Гц. Такие эффекты генерации ЭМИ могут вносить вклад в радиоизлучение, возникающее при землетрясениях.

Для выяснения возможности генерации ЭМИ дислокациями и трещинами при прохождении упругой волны через образец были проведены исследования [13], в результате которых установлено, что акустическая волна (определенной мощности), проходящая через кристалл без трещин, вызывает генерацию ЭМИ на той же частоте. Мощность ЭМИ зависит от плотности, длины и времени жизни заряженных дислокаций, а также от ориентации и удаления антенны относительно кристалла.

Генерация ЭМИ возникает при движении зарядов относительно неподвижной среды (системы токов), при периодических колебаниях дипольных и т.п. моментов в среде (пьезоэффект) и при движениях частей среды с разделенными неподвижными зарядами. Эти механизмы должны быть связаны с электризацией стенок трещин и с динамикой их движения [12].

Возникновение зарядов на поверхностях трещин обычно связывают с движением к ней или вновь возникающими на ней дефектами и дислокациями. Но возможен и другой механизм электризации, обусловленный случайными разрывами межатомных и межионных связей при росте трещины, приводящими к образованию на поверхности трещины зарядовой мозаики, т.е. флуктуационного заряда. Возникновение зарядовой мозаики на берегах трещин приводит к генерации ЭМИ за счет появления токов релаксации зарядов.

Второй из рассматриваемых механизмов генерации ЭМИ связан со сближением заряженных берегов трещин. Каждый участок трещины, заряды на котором не успели релаксировать, обладает электростатической энергией не зависящей, что характерно для флуктуационного процесса, от площади участка. При сближении берегов трещины эта энергия переходит в ЭМИ.

Экспериментальное исследование вопроса о существовании этих эффектов целесообразно проводить при отсутствии помех излучения, связанных с движением дефектов структуры, в частности дислокаций [12].

Хатиашвили Н. Г., Перельман М. Е. [14] в статье обсудили еще один механизм генерации ЭМИ при подготовке землетрясений, во время и после него (афтершоки). Как установлено [13], при прохождении через ионный

кристалл диэлектрика ультразвука (УЗ) достаточной интенсивности в кристалле генерируется ЭМИ на частоте УЗ и вдвое меньшей частоте. Эффект этот можно объяснить возникновением, освобождением и колебаниями в поле УЗ заряженных линейных дислокаций, а при большей интенсивности УЗ – сближением и раздвижением флуктуационно-заряженных берегов микротрещин [12]. Не смотря на то, что раньше существовали разные причины генерации ЭМИ при прохождении УЗ волны по диэлектрику, в данной работе показано, что генерация ЭМИ с достаточно низкой частотой, пропорциональной частоте УЗ, может вызываться только эффектами, связанными с трещинами и дислокациями.

Итак, установлено, что колебания заряженных дислокаций должны приводить к генерации ЭМИ. Очевидно, должен существовать и обратный эффект: в переменном электромагнитном поле заряженные дислокации, приходя в колебания, будут излучать акустические колебания на частоте электромагнитного поля. В отличие от пьезоэлектрического, этот эффект должен зависеть от предыстории образца и носить пороговый характер.

Поскольку горные породы содержат зерна различных типов веществ – диэлектриков и проводников, то при трещинообразовании и распространении мощных акустических волн в горных породах практически все входящие в эти породы компоненты должны вносить вклады в генерацию ЭМИ.

В работе [15] обсуждается еще один механизм генерирования ЭМС. В областях, где находятся очаги землетрясений или через которые в процессах сейсмической активности проходят акустические потоки, имеются системы с разделенными зарядами, колебания которых может генерировать ЭМИ, – двойные электрические слои на границах зерен твердых тел и электролитов (в том числе, пленок воды) и зоны контактной разности потенциалов между границами твердых тел. В работе была проведена оценка интенсивности ЭМИ при колебательном сжатии двойных слоев и показано, что этот эффект может внести существенный вклад в интенсивность ЭМИ при землетрясениях. Полученные данные экспериментально доказывают наличие эффекта генерации

ЭМИ при прохождении акустической волны через среду, в которой имеются двойные слои. В статье было отмечено, что должен существовать и обратный эффект: в переменном электрическом поле должны возникать электрострикционные явления (в двойных слоях и генерация в них УЗ).

В работе [16] говорится, что изменение емкости двойного электрического слоя (ДЭС), обусловленное изменением потенциала электрода или адсорбцией органических веществ на нем, при действии переменного тока приводит к электромагнитному излучению (ЭМИ), улавливаемому антенной, не связанной с ячейкой поляризации.

В ранних работах Воробьева А.А., Гохберга М.Б., Егорова П.В. [17-19] и последующих работах Сальникова В.Н., Заверткина С.Д., Арефьева К.П. [20] отмечается, что появление ЭМС в диэлектрических материалах возможно в результате протекания различных физических процессов, в том числе при их механическом возбуждении, воздействии теплом, облучением, электрическим полем.

По мнению многих исследователей, условием для генерирования ЭМС является электризация поверхностей образующихся в результате механического воздействия дефектов или самой поверхности исследуемого материала [21,22]. При деформации и разрушении кристаллов электризация происходит за счет: разрыва ионных связей при движении трещин в материала; движения заряженных частиц; адгезии; электрокинетических явлений.

По мнению Головина Ю.А., Финкеля В.М., Мирошниченко М.И. [23-25] в щелочно-галогидных кристаллах ЭМС регистрируется в диапазоне  $10 \div 10^7$  Гц. Генерирование ЭМС связывается с двумя механизмами: формированием линий скольжения дислокаций на ранних стадиях микропластического деформирования [23] и скачкообразным распространением трещин [25]. Авторы считают, что лишь эти два механизма способны создавать поля, близкие по интенсивности к регистрируемым [23].

Процессы изменения электрического момента трактуются по-разному. В работе Гольда Р.М. [26] появление сигналов объяснялось газоразрядными

процессами в полостях развивающихся микротрещин. Реализация газоразрядного механизма возможна между локальными участками поверхности микротрещины, для которых выполняется закон Пашена [12,27], выражающий зависимость потенциала зажигания разряда от произведения давления газа на газоразрядный промежуток. Перельман М.Е. и Хатиашвили [12] предложили ряд моделей, основанных на трансляции заряда. Они считают, что сигналы могут быть обусловлены изменением емкости при перемещении заряженных поверхностей микротрещин, а также ускоренным развитием заряженного устья или бортов микротрещин, при этом диапазон сигнала по их оценкам составляет  $1 \div 10^3$  МГц.

Впервые Воробьев А.А. и Сальников В.Н. наблюдали ЭМС при нагревании образцов горных пород и минералов [28,29]. Появление ЭМС связывается в этих работах с разрядными процессами между заряженными до высоких потенциалов поверхностями микроразрушений.

Результаты измерений ЭМЭ на образцах горных пород и в условиях их естественного залегания, проведенные Воробьевым А.А., Сальниковым В.Н., Дмитриевским [29,30,31] свидетельствуют о возможности возникновения разрядов и ЭМС на контактах горных пород, окварцованных зонах повышенной трещиноватости.

Исследованиями электризации минералов и горных пород при воздействии на них нагрузок показало, что поверхности возникающих при этом трещин покрыты электрическими зарядами противоположных знаков. Область наибольших напряжений создается в месте образования трещины. При достижении определенной разности потенциалов происходит разряд в газе трещины или в самом диэлектрике между разноименно заряженными поверхностями. Ускоренное движение заряда по поверхностям сопровождается возникновением электромагнитного поля [32].

Таким образом, при изменении напряженно-деформированного состояния горного массива происходит непрерывное преобразование горными породами механической энергии в электрическую, ее накопление и

последующее выделение в виде электромагнитной эмиссии [32]. Электромагнитная эмиссия излучается в виде быстрого следующих друг за другом серий импульсов длительностью  $10^{-7} - 10^{-3}$  с.

## **1.2 Возможность оценки параметров электромагнитного сигнала**

Открытие явления электромагнитного излучения, сопровождающего процесс трещинообразования в различных материалах, создало предпосылки для разработки методик исследования разрушения нагруженных материалов, в том числе и горных пород, по их ЭМИ. Особенно это актуально при мониторинге напряженного состояния земных недр и прогнозе горных ударов. К числу информативных параметров ЭМИ обычно относят длительность импульсов ЭМИ, их число, энергию, амплитуду, спектральный состав.

Мастовым Ш.Р., Гольдом Р.М. и Яворович Л.В. в работе [33] проведено исследование, показавшее, что частота следования электромагнитных импульсов и величина их амплитуды при механическом нагружении образцов горных пород различного размера меняются так же, как изменяется прочность образцов при изменении их размеров.

В исследованиях Курленя М.В. [34] была оценена длительность сигналов электромагнитного излучения при разрушении горных пород, на примере мрамора. Результаты показали, что структура синтезированных алгоритмов оценки длительности сигнала не зависит от неизвестных параметров сигнала и шума. Средняя длительность сигналов, возникающих при разрушении образцов из мрамора составила 20,6 мс.

Физическими предпосылками прогноза разрушения горных пород на основе регистрации электромагнитного излучения является то, что перед разрушением массива в некотором промежутке времени, относительно небольшом по длительности, в нагруженном материале возникает большое число новых микротрещин и последующее их прораствание. Поскольку трещины излучают сигналы электромагнитного излучения с частотами, обратно

пропорциональными их размерам, то в момент зарождения микротрещин наблюдается увеличение амплитуды сигнала ЭМИ, а его частота является максимальной. Сравнивая изменение амплитуды максимумов спектральной плотности во времени и по частоте, можно судить о моменте зарождения микротрещин, т.е. о моменте начала разрушения массива пород [35,36].

На основании результатов экспериментальных исследований амплитуды ЭМС, в работе [37] установлено, что при акустическом возбуждении с применением ударного устройства, с увеличением пористости (текстурной характеристикой горных пород) уменьшается амплитуда электромагнитного сигнала по экспоненциальному закону. Параметры электромагнитного сигнала могут изменяться в зависимости и от других текстурных особенностей исследуемых горных пород: зернистости, размеров и направления слоистости.

Таким образом, можно сделать вывод о том что, различные виды механического воздействия на твердые диэлектрики, в том числе и на горные породы приводят к механоэлектрическим преобразованиям. Результатом таких механоэлектрических преобразований является электромагнитный сигнал (ЭМС) в радиочастотном диапазоне. Установлено, что интенсивность ЭМС зависит от прочности, упруго-пластических свойств и от величины механической нагрузки. Обнаружено также изменение амплитуды [38], длительности и частоты следования ЭМС на разных стадиях деформации образцов. Одним из перспективных способов механического воздействия, позволяющим проводить контроль качества диэлектрических материалов по параметрам ЭМС, является динамическое возбуждение.

### **1.3 Связь параметров акустической эмиссии и ЭМС**

В последние годы большое внимание уделяется исследованию характеристик электромагнитной эмиссии, являющихся откликом на акустическое воздействие или акустическую эмиссию.

В процессе механического воздействия на горные породы происходит их деформирование и разрушение, сопровождающееся образованием и развитием трещин [39]. При этом возникает электромагнитная эмиссия (ЭМЭ). Одновременно с ЭМЭ наблюдается и появление акустической эмиссии (АЭ), развивающейся с нарастанием активности, и достигающей своего максимального значения во время макроразрушения. Электромагнитная эмиссия возникает при смещении зарядов или изменения дипольного момента на поверхности раздела фаз (неоднородностей) или дефектов среды при приложении импульсной нагрузки [40]. В исследованиях Хатиашвили Н.Г. [13] показано, что существует связь между ЭМЭ и АЭ. Источником возникновения ЭМИ при разрушении диэлектрических материалов являются упругие колебания, возникающие в ходе трещинообразования (акустическая эмиссия). Этот эффект авторы объясняют возникновением, освобождением и колебаниями в поле ультразвука заряженных линейных дислокаций, которые при прохождении через них акустической волны вносят свой вклад в генерацию ЭМС, а при большей интенсивности ультразвука – сближением и раздвижением флуктуационно-заряженных бортов микротрещин, неравномерное движение которых ответственно за ЭМЭ. С ростом частоты ультразвука уровень излучения уменьшается. По этой причине авторы проводили эксперименты на частоте 20 кГц. Так же в этой работе замечено, что при прохождении через кристалл упругой волны с частотой  $\nu_a$ , фиксируется ЭМС, в спектре которого преобладает такая же частота  $\nu_a$ . Увеличение нагрузки на образец до появления первых дислокаций вызывает увеличение интенсивности ЭМС в полтора - два раза на этой же частоте  $\nu_a$ . Таким образом, в исследовании установлено, что акустическая волна, проходящая через кристалл без трещин, вызывает генерацию ЭМС на той же частоте.

В работе Хатиашвили Н.Г. [14] показано, что образование трещин в твердых телах и разрывов в жидкостях сопровождается генерацией электромагнитного излучения, существенная доля которого сосредоточена в диапазоне  $10^4$ - $10^9$  Гц. Такие эффекты генерации ЭМИ могут вносить вклад в



радиоизлучение, возникающее при землетрясениях. Генерация ЭМИ возникает при движении зарядов относительно неподвижной среды (системы токов), при периодических колебаниях дипольных моментов в среде (пьезоэффект) и при движениях частей среды с разделенными неподвижными зарядами.

В работе Хатиашвили Н.Г. и Перельмана М.Е. [41] установлено, что генерация ЭМИ при прохождении ультразвуковой волны по диэлектрику может вызываться следующими причинами:

1. Эффекты, связанные с типом решетки (пьезоэффект, электрострикция).
2. Эффекты, связанные с электронной подсистемой (акусто-ЭДС).
3. Эффекты, связанные с дефектами решетки.

В исследованиях [41] также отмечено что, генерация ЭМИ с достаточно низкой частотой, пропорциональной частоте ультразвука, может вызываться только эффектами, связанными с трещинами и дислокациями. В переменном электромагнитном поле заряженные дислокации, приходя в колебания, будут излучать акустические колебания на частоте электромагнитного поля. При трещинообразовании и распространении мощных акустических волн в горных породах практически все входящие в эти породы компоненты должны вносить вклады в генерацию ЭМИ.

Проведенное Кузнецовым С.В. в [42] экспериментальное исследование изменения параметров ЭМЭ при одноосном сжатии образцов различных горных пород установило, что электромагнитные импульсы появляются при напряжениях, превышающих величину  $(0,7 \div 0,8) \sigma_{сж}$ . При дальнейшем увеличении нагрузки происходит снижение частоты фиксируемых импульсов: если первоначально эмиссия появляется в диапазоне частот  $(200 \text{ кГц} \div 1,5 \text{ МГц})$ , то с дальнейшим ростом напряжения диапазон эмиссии уже иной  $(20 \div 100) \text{ кГц}$ . В момент разрушения образцов интенсивность эмиссии максимальна во всем частотном диапазоне и амплитуды низкочастотных составляющих преобладают над остальной частью спектра. Длительность электромагнитных импульсов меняется от 0,1 мс до 0,5 мс.

Согласно работе Ямщикова В.С. [43], особенности генерирования акустической и электромагнитной эмиссии образцами горных пород в лабораторных исследованиях позволяют получить количественные оценки механических напряжений, действующих в массиве горных пород. Появление электромагнитных импульсов в данной работе связывается с движением заряженных дислокаций под действием девиаторной нагрузки.

В работе Болотина Ю.И. [44] отмечено, что теоретические исследования и экспериментальные измерения сигналов АЭ [45,46] и ЭМЭ, проведенной Ивановым В.В. в [47] показали идентичный характер формы импульсов. При образовании разрыва сплошности среды происходит резкое возрастание величины смещения берегов трещины до максимального значения. Эта стадия характеризуется наибольшей скоростью колебательного смещения, затем происходит замедление, стабилизация и торможение трещины. Аналогичные данные получены путем измерения приведенной напряженности электрического поля или относительной разности потенциалов от времени развития разрушения. Соотношение энергий электромагнитного и акустического излучений, описывается выражением  $m_0 = \delta_0^2 / \sigma_{кр} \cdot \varepsilon$  [48], где  $\delta_0$  - поверхностная плотность электрических зарядов;  $\sigma_{кр}$  - критическое напряжение развития трещин, которое зависит от модуля упругости, поверхностной энергии развития трещин, стартовых размеров трещины и величины скачка трещины, а также от коэффициента Пуассона;  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость. Это соотношение характеризует распределение электроупругих полей при образовании трещин нормального отрыва.

Интерес для понимания природы возникновения электромагнитной эмиссии при квазистатическом нагружении образцов неорганического стекла, полиамида, многослойной клеевой конструкции с сотовой и ячеистой структурой, стеклопластика вызывают результаты исследования Гордеева В.Ф. [48]. В результате проведенных экспериментальных исследований авторы

пришли к выводу о том, что основными механизмами генерации электромагнитной эмиссии являются:

- скачкообразное появление, разделение или релаксация электрического заряда на возникающей свежей поверхности трещины нормального отрыва;
- электрический разряд между отдельными частями материала при его разрушении;
- колебательное движение образующихся в момент разрыва заряженных поверхностей, концов волокон, краев разрыва, под воздействием акустических колебаний в актах разрушения.

Изучение электромагнитной эмиссии, сопровождающей механическое нагружение образцов горных пород, позволило авторам исследований [49,50] прийти к следующему выводу, основанному на термофлуктуационном характере возникновения и развития микротрещин в нагружаемых образцах горных пород, щелочно-галоидных кристаллов и на предположении, что каждый акт "проскока" микротрещин на стадии их рассеянного накопления сопровождается импульсным электромагнитным сигналом (ЭМС). Поток импульсов ЭМЭ, возникающих при нагружении образцов горных пород, ЩГК является пуассоновским потоком событий, в котором среднее время ожидания импульсов экспоненциально снижается при увеличении действующей на образец механической нагрузки.

В исследовании Вострецова А.Г., Яковицкой Г.Е. [51] при разработке модели сигнала ЭМЭ, возникающей при развитии трещинообразования в горных породах, и с учетом кинетики накопления трещин, формы возникающих электромагнитных сигналов установлено, что процесс образования трещин следует рассматривать как однородный пуассоновский процесс, развивающийся в четырех измерениях. Результирующий сигнал ЭМЭ можно рассматривать как стационарный профильтрованный пуассоновский процесс.

Использование электромагнитного отклика среды при распространении сейсмического сигнала во фрагментированном горном массиве для наблюдений динамических явлений процессов в земной коре, предложено в работе

Динариева Д. [52]. Здесь построена количественная теория электромагнитных явлений при распространении сейсмических сигналов в средах с микроструктурой.

Теоретическое обоснование физики электромагнитного эмиссионного метода контроля качества диэлектрических материалов дано в работе Ласукова В.В. [53]. Здесь показано, что возбуждение механических колебаний однократным нормированным ударом, приводит к возникновению тока смещения, который зависит от скорости изменения дипольного момента и от скорости изменения объемной плотности элементарных источников. Величина, пространственная структура поверхностных зарядов и амплитуда колебаний зарядов определяются физико-химическими свойствами внутренних областей исследуемых образцов.

В исследованиях А.А. Беспалько, Р.М. Гольд и Л.В. Яворович [54] показано, что амплитуда ЭМС при акустическом возбуждении из крупнокристаллического мрамора выше, чем из мелкокристаллического, что определяется величиной дипольного момента структурных элементов.

Прохождение акустического импульса через диэлектрический образец с протяженным дефектом вызывает электромагнитный отклик, в спектре которого выделяются полосы частот, определяемые размерами образца и дефекта. В работе [55] сопоставление экспериментально полученных данных об изменениях параметров электромагнитного отклика при акустическом воздействии на неоднородные диэлектрические образцы с результатами численного моделирования волнового процесса позволило установить связь скорости смещения границ раздела с амплитудой электромагнитного сигнала.

В спектре ЭМС при пьезоакустическом возбуждении всегда присутствуют спектральные полосы, обусловленные собственной резонансной частотой образца. Этот вывод значим для определения диапазона частот измерительной аппаратуры, проектируемой и используемой в лабораторных и натурных условиях. Экспериментально в натурных условиях установлено, что этот диапазон лежит в интервале от десятков герц до сотен килогерц. Исходя из

исследований в работе [56], это с большой вероятностью связано с размерами блоков, составляющих массивы горных пород. Исследования по оценке блочности массивов горных пород, проведенные в ИГД СО РАН под руководством чл.-корр. Опарина В.Н. [57], показали, что распределение размеров блоков находится в интервале  $(2 \div 100)$  см. Используя соотношение для основной гармоники частот  $f = V_z/2L$ , можно убедиться, что блоки таких размеров будут преимущественно излучать ЭМС именно в названном выше диапазоне частот.

Таким образом, наблюдается связь параметров ЭМС с характеристиками возбуждающего акустического сигнала. Это указывает на то, что акустические сигналы, генерируемые при возникновении и росте трещин, оказывают существенное влияние на частотный спектр ЭМС, в том числе и в натурных условиях. Изменение амплитуды и длительности возбуждающего акустического сигнала, а также расстояния от принимающего электромагнитный сигнал датчика до излучающей поверхности приводят к изменениям в амплитудно-частотных характеристиках ЭМС.

#### **1.4 Предпосылки к исследованию двойных электрических слоев в диэлектрических материалах**

Появление электрического заряда на поверхности глинистых минералов, образование двойного электрического слоя обеспечивает значительное изменение механических свойств, глинистой горной породы при изменении внешних условий. Изменение механических свойств, глинистой горной породы связано с возможностью реализации структурной перестройки адсорбционного и диффузного слоев двойного электрического слоя при введении в раствор ионов большей валентности, изменении температуры, использовании дисперсионной среды иной природы и пр.

На адгезионной поверхности контактирующих минералов, входящих в состав горной породы, при отсутствии механического воздействия появление электрических зарядов может произойти и вследствие разности работ выхода

электронов контактирующих минералов. В этом случае происходит переход носителей зарядов с поверхности одного минерала на поверхность другого, возникает контактная разность потенциалов [58].

В исследованиях [59, 60] показано, что колебания акустическими волнами границ неоднородностей и контактов разных пород и минералов, в которых формируются двойные электрические слои, сопровождаются электромагнитной эмиссией. Акустические сигналы приводят к изменению дипольных моментов двойных электрических слоев на границах контактов разнородных веществ и, как следствие, к возбуждению ЭМС, параметры которых несут информацию о механическом состоянии исследуемого материала [61].

В работе [62] приведены результаты исследований параметров электромагнитного сигнала при акустическом воздействии на слоистые горные породы, представленные серпентинитом. Электромагнитный сигнал из составляющих серпентинит компонентов (хризотил-асбест и серпентинит) незначителен. Однако сам серпентинит, вызванный наличием множественных двойных электрических слоев, при акустическом возбуждении приводит к резкому возрастанию амплитуды ЭМС. Установлено, что в спектре электромагнитного сигнала возможно появление максимумов, обусловленных биением при сложении близких частот. Анализ полученных данных подтверждают резонансный колебательный механизм возникновения электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении сложных по текстуре образцов горных пород.

В исследованиях Т.В. Фурса [63] установлена определяющая роль двойного электрического слоя электромагнитного отклика из слоистых композиционных материалов. И оценена плотность эффективного заряда двойного электрического слоя на границе адгезионного контакта двухкомпонентной системы цемент-гипс, которая оказалась порядка  $4 \cdot 10^{-9}$  Кл/см<sup>2</sup>.

В работе [64] установлено что, одним из механизмов механоэлектрический преобразований при ударном возбуждении слоистых композиционных материалов является механизм, связанный с генерированием переменного электромагнитного поля, обусловленного движением зарядов двойного электрического слоя, находящегося на границе компонентов в композите акустической волной возбуждения, относительно приемника сигнала при неизменной конфигурации системы двойной слой-приемник сигнала.

### **1.5 Постановка задачи**

Электромагнитная эмиссия является одним из информационных каналов, позволяющим проводить оценку изменений напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. Изменение механических свойств горных пород в результате действия всесторонних напряжений приводит к возникновению или активизации источников электромагнитных сигналов. Исследования показали, что излучение электромагнитной энергии является многофакторным процессом, зависящим от физических свойств горных пород, генетического типа и структурно-текстурных особенностей. Как и в условиях изменения напряженно-деформированного состояния, источниками электромагнитной эмиссии могут являться колебания двойных электрических слоев, происходящих под воздействием акустических волн.

Таким образом, на основании проведенного анализа литературных источников была поставлена задача проведения лабораторного исследования изменения параметров ЭМС при акустическом возбуждении образцов горных пород слоистой текстуры. Представителем таких горных пород является серпентинит. Поскольку одним из источников ЭМС служит колебание зарядов двойного электрического слоя, то целью работы является оценка влияния количества двойных электрических слоев на параметры ЭМС.

## **2 ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

В процессе проведения исследований на образцах серпентинита использовались методики, разработанные в проблемной научно-исследовательской лаборатории электроники диэлектриков и полупроводников Томского политехнического университета. Используемые методики позволяли проводить регистрацию электромагнитного сигнала при акустическом воздействии на образцы. Акустическое воздействие производилось двумя способами: динамическое воздействие с использованием стального шарика и введением акустических сигналов в образцы с помощью пьезопреобразователя.

### **2.1 Петрографическое описание исследуемых образцов**

Объектом исследования являлись образцы горной породы, представленные серпентинитом, которые имеют типичную полосчатую текстуру, чередование слоев серпентина и хризотил-асбеста, волокна которого перпендикулярны слоям (поперечноволоконистый тип). Слои хризотил-асбеста имели мощность  $(1-1,5) \cdot 10^{-3}$  м, серпентина –  $(2-4) \cdot 10^{-3}$  м. Наблюдаются тонкие трещиноватости в направлении почти перпендикулярные слоистости. Образцы серпентинита имели форму параллелепипеда. Размеры в исходном состоянии  $(6 \times 3,5 \times 2,4) \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>.

Серпентин состоит из MgO – 43%, SiO<sub>2</sub> – 44.1%, H<sub>2</sub>O – 12.9%, химическая формула [Mg<sub>6</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>], примеси: FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и NiO. Хризотил-асбест - тонковолокнистая разновидность серпентина. На фоне основной массы серпентина выделяется в виде прожилков. Различают поперечноволоконистый тип (волокна ориентированы под прямым углом или наклонно к стенкам жил) и продольноволокнистый тип (волокна ориентированы параллельно стенкам).



На рисунке 1 приведено строение образца серпентинита.

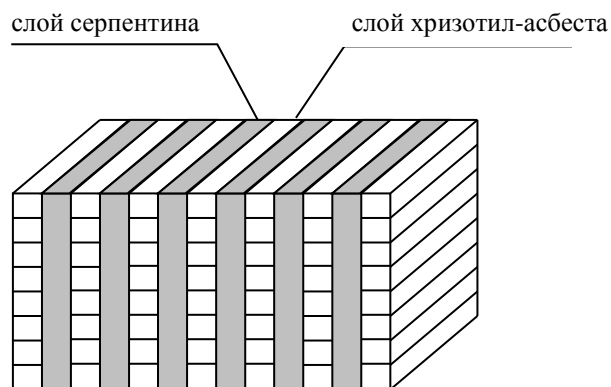


Рисунок 1 – Строение образца серпентинита

На рисунке белым цветом обозначен минерал хризотил-асбест, а серым – серпентин.

На рисунке 2 представлено фото образца серпентинита.



Рисунок 2 – Образец серпентинита

## **2.2 Методика исследования параметров электромагнитных сигналов при динамическом воздействии на образцы**

При динамическом воздействии на образцы серпентинита использовался стальной шарик, который вылетал из пистолета с пружинным устройством. Шарик пролетал через измерительную трубку и осуществлял удар по образцу, возбуждая акустический импульс.

Блок-схема системы с динамическим возбуждением, представлена на рисунке 3.

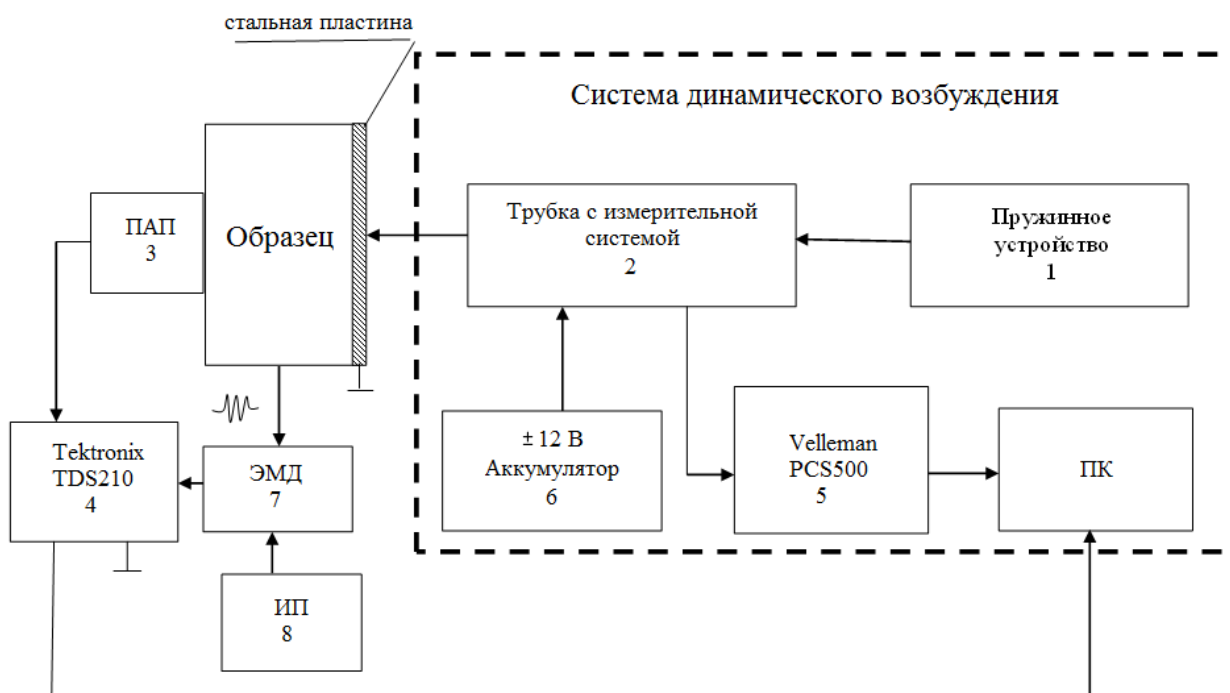


Рисунок 3 – Блок-схема системы динамического возбуждения

1 – пневматический пистолет с пружинным устройством; 2 – трубка с измерительной системой времени пролета шарика; 3 – ПАП – пьезоакустический приемник; 4 – цифровой двухканальный осциллограф Tektronix TDS210 с возможностью запоминания сигналов и передачи их на компьютер. Полоса пропускания прибора равна 60 МГц, чувствительность 2 мВ/дел; 5 – осциллографическая приставка Velleman PCS500; 6 – аккумулятор с питанием  $\pm 12$  В; 7 – ЭМД – электромагнитный дифференциальный датчик, со встроенным усилителем мощности для согласования входного сопротивления емкостного датчика и принимающего сигнал электронного усилителя с коэффициентом усиления 100; 8 – источник питания электронной схемы ЭМД.

В образец через заземленную металлическую пластину и иммерсионный слой минерального масла пружинной механической системой (1), использующей стальной шарик, вводился акустический импульс (АС). Проходя через образец, акустический сигнал регистрировался пьезоакустическим

приемником (3). Сигнал с (3) служил для запуска осциллографа (4) и записывался на его экране. Генерируемый при прохождении акустического сигнала ЭМС регистрировался емкостным дифференциальным датчиком (7), который принимал электрическую составляющую ЭМС. С электромагнитного датчика (7) усиленный ЭМС поступал на осциллограф Tektronix TDS210 (4). Далее ЭМС и АС с осциллографа передавались на компьютер ПК, где производилась их дальнейшая обработка и анализ. Для изменения длительности и амплитуды акустического сигнала ударное воздействие проводилось с использованием стальных шариков массой  $0,25 \cdot 10^{-3}$  и  $0,86 \cdot 10^{-3}$  кг, что соответствовало длительности фронта акустического возбуждения  $10 \cdot 10^{-6}$  с и  $14 \cdot 10^{-6}$  с.

### 2.3 Методика исследования параметров электромагнитных сигналов при пьезоакустическом возбуждении образцов

При пьезоакустическом воздействии на образцы горных пород использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой представлена на рисунке 4.

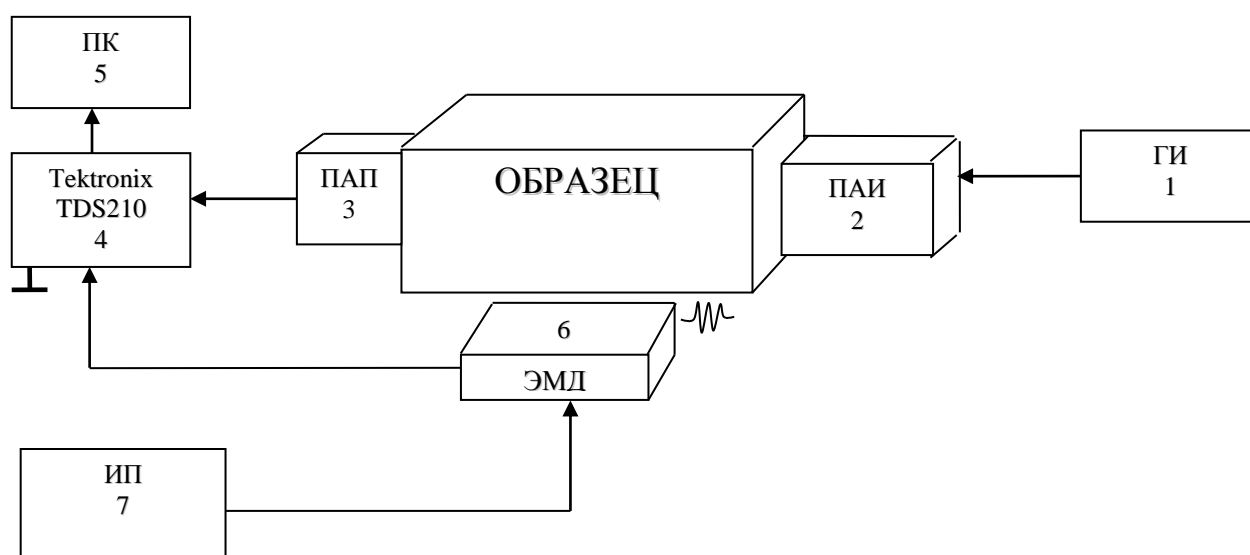


Рисунок 4 – Блок-схема экспериментальной установки для регистрации ЭМС при пьезоакустическом возбуждении

1 – генератор высоковольтных импульсов для возбуждения пьезоакустического излучателя. Длительность вырабатываемых импульсов:  $10^{-6}$ - $10^{-4}$  с, а амплитуда импульсов напряжения на обкладках пьезоэлектрической керамики 100-800 В; 2 – ПАИ – пьезоакустический излучатель; 3 – ПАП – пьезоакустический приемник; 4 – цифровой двухканальный осциллограф Tektronix TDS210 с возможностью запоминания сигналов и передачи их на компьютер. Полоса пропускания прибора равна 60 МГц, чувствительность 2 мВ/дел; 5 – ПК – персональный компьютер; 6 – ЭМД – электромагнитный дифференциальный датчик, со встроенным усилителем мощности для согласования входного сопротивления емкостного датчика и принимающего сигнал электронного усилителя с коэффициентом усиления 100; 7 – источник питания электронной схемы ЭМД.

Для возбуждения ЭМС к образцу через акустический контакт (минеральное масло) с помощью пьезоизлучателя (2) вводился акустический сигнал, распространяющийся по образцу с продольной скоростью звука. Акустический сигнал, проходя через образец, возбуждал ЭМС и регистрировался с помощью пьезоакустического приемника (3) на экране осциллографа (4). Для приема ЭМС служит емкостной датчик (6), который принимал электрическую составляющую ЭМС. Датчик имеет согласованный дифференциальный вход. Усиленный ЭМС с датчика (6) поступал на другой вход осциллографа Tektronix TDS210 (4). С осциллографа (4) ЭМС через интерфейс записывался в память компьютера (5), где затем производилась его дальнейшая обработка. Анализ ЭМС производился по программам Microsoft Excel и Origin 7.

## **2.4 Методика определения скорости звука в образцах**

В ходе исследований регистрируемых в эксперименте электромагнитных сигналов необходимо знать скорость звука в исследуемых образцах горных пород. Для определения продольной скорости звука использовалась экспериментальная установка, приведенная на рисунке 5.

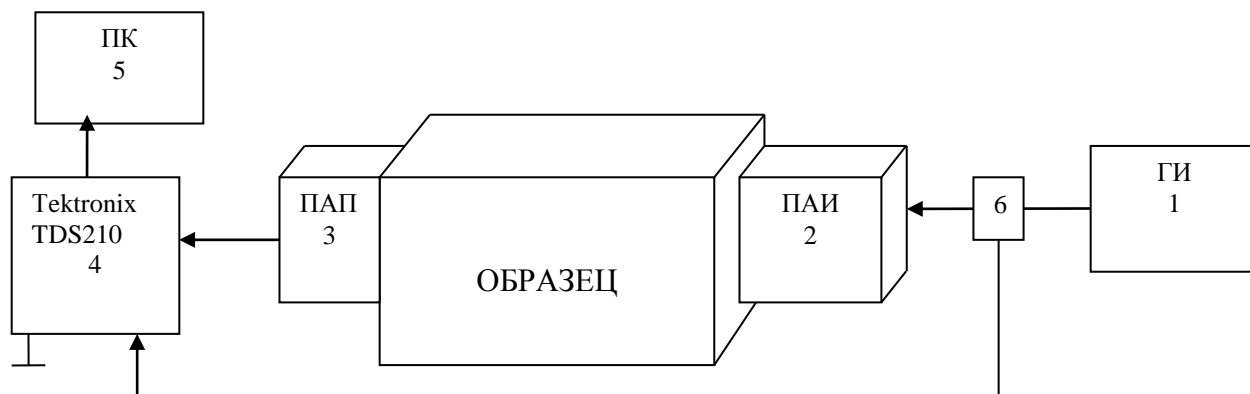


Рисунок 5 – Схема установки для измерения скорости звука

1 – генератор высоковольтных импульсов для возбуждения пьезоакустического излучателя. Длительность вырабатываемых импульсов:  $10^{-6}$ - $10^{-4}$  с. Амплитуда импульсов: 100-800 В; 2 – ПАИ – пьезоакустический излучатель; 3 – ПАП – пьезоакустический приемник; 4 – цифровой двухканальный осциллограф Tektronix TDS210 с возможностью запоминания сигналов и передачи их на компьютер. Полоса пропускания прибора равна 60 МГц, чувствительность 2 мВ/дел; 5 – персональный компьютер; 6 – делитель напряжения.

С генератора (1) на пьезоакустический излучатель (2) подавался электрический импульс, возбуждающий в пьезопреобразователе за счет прямого пьезоэффекта акустического сигнала. Одновременно через омический делитель напряжения (6), на другой вход осциллографа подавался импульс, амплитуда которого пропорциональна напряжению, возбуждающему пьезоакустический излучатель. Коэффициент пропорциональности – 200. В результате на осциллограмме видна форма этого возбуждающего импульса напряжения и его начало. Акустический сигнал вводился через акустический контакт в исследуемый образец. После прохождения через образец, акустический сигнал поступал на пьезоакустический приемник (3), который преобразовывает его за счет прямого пьезоэффекта в электрический сигнал,

который затем отображался на экране осциллографа (4). С помощью маркеров осциллографа, определяются необходимые временные характеристики для расчетов скорости звука в исследуемом образце. Зная длину образца  $L$  и время, за которое звук проходит в образце  $\Delta\tau$ , можем определить скорость звука по формуле:

$$V_3 = \frac{L}{\Delta\tau - t_{\text{задержки}}} , \quad (1)$$

где  $t_{\text{задержки}}$  - время задержки, равное  $6,01 \cdot 10^{-6}$  с.

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследование механоэлектрических преобразований при акустическом воздействии на образцы горных пород слоистой текстуры, представленных серпентинитом проводилось с использованием двух методик: методика динамического возбуждения стальным шариком и методика пьезоакустического воздействия. В процессе экспериментов регистрировались параметры ЭМС при уменьшении количества слоев серпентинита, путем снятия  $(3-4) \cdot 10^{-3}$  м породного материала.

#### 3.1 Исследование параметров ЭМС при пьезоакустическом возбуждении образцов серпентинита

В начале экспериментов была измерена продольная скорость звука в образце, которая соответствует 4110 м/с. Это значение скорости близко к продольной скорости звука приведенной в справочнике [65].

Собственная резонансная частота образцов, имеющих свои линейные размеры и особенности текстуры, рассчитывалась по формуле:

$$f = \frac{V_3}{2L}, \quad (2)$$

где  $V_3$  – скорость звука в образце;

$L$  – линейный размер образца.

Далее проводились исследования изменения параметров ЭМС в зависимости от длительности и напряжения возбуждающего импульса при уменьшении количества слоев в образце серпентинита. Для зарегистрированных в процессе проведения экспериментов аналоговых ЭМС и акустического сигнала (АС) рассчитывался амплитудно-частотный спектр с помощью операции быстрого преобразования Фурье.

Поскольку серпентинит имеет достаточно сложное структурно-текстурное строение, при проведении экспериментов ось симметрии

дифференциального электромагнитного датчика располагалась или вдоль направления распространения акустического воздействия или поперек.

На рисунках 6 (а,б), 7 (а,б), 8 (а,б) и 9 (а,б) представлены электромагнитный сигнал и его амплитудно-частотный спектр при прозвучивании образца серпентинита в исходном состоянии с размерами  $(6 \times 3,5 \times 2,4) \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ . ЭМД располагался на расстоянии  $1 \times 10^{-2} \text{ м}$  от боковой поверхности образца перпендикулярно фронту распространения продольной акустической волны, при этом ось электромагнитного датчика располагалась поперек распространения акустического сигнала. Длительность пьезоакустического возбуждения изменялась от  $(5-100) \cdot 10^{-6} \text{ с}$  при напряжении возбуждения ПАИ 400 В.

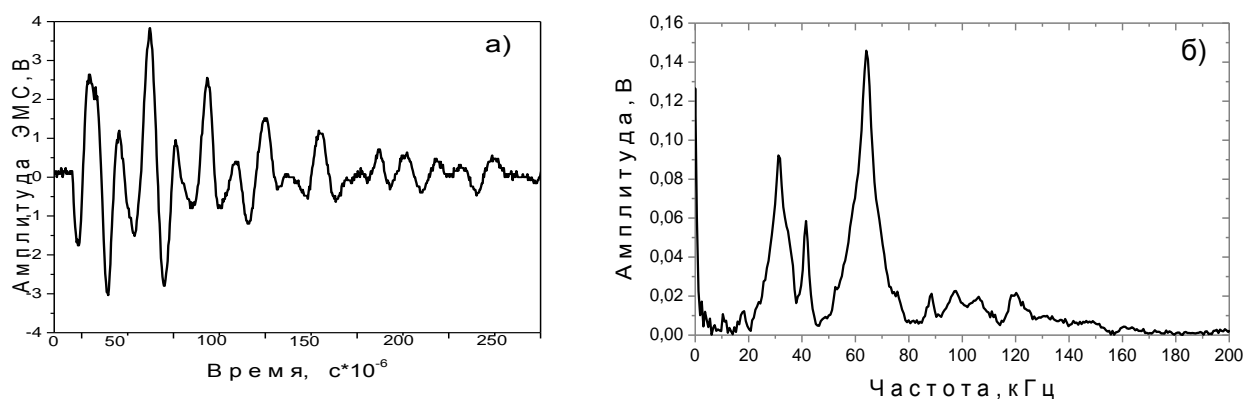


Рисунок 6 – Электромагнитный сигнал (а) и его амплитудно-частотный спектр (б) при пьезоакустическом возбуждении длительностью  $5 \cdot 10^{-6} \text{ с}$

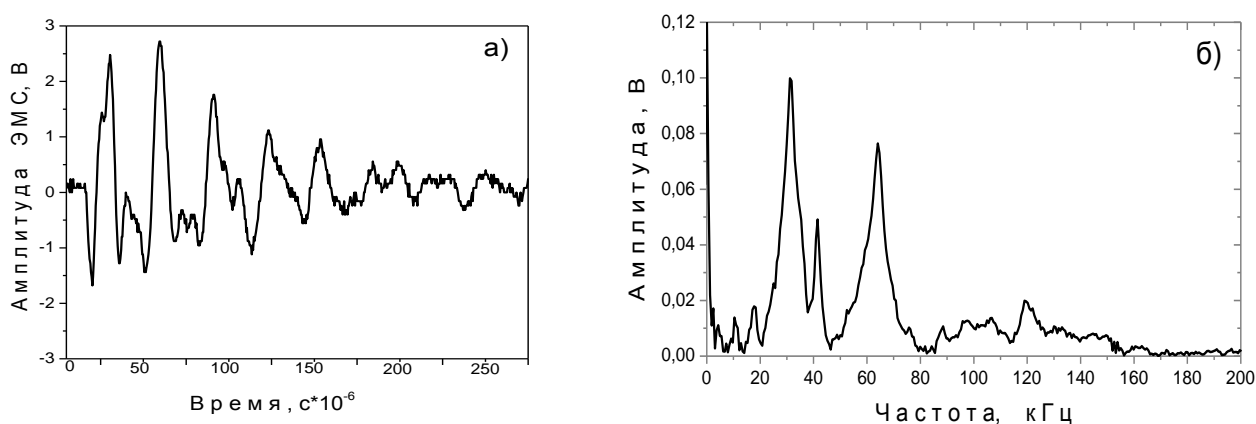


Рисунок 7 – Электромагнитный сигнал (а) и его амплитудно-частотный спектр (б) при пьезоакустическом возбуждении длительностью  $10 \cdot 10^{-6} \text{ с}$



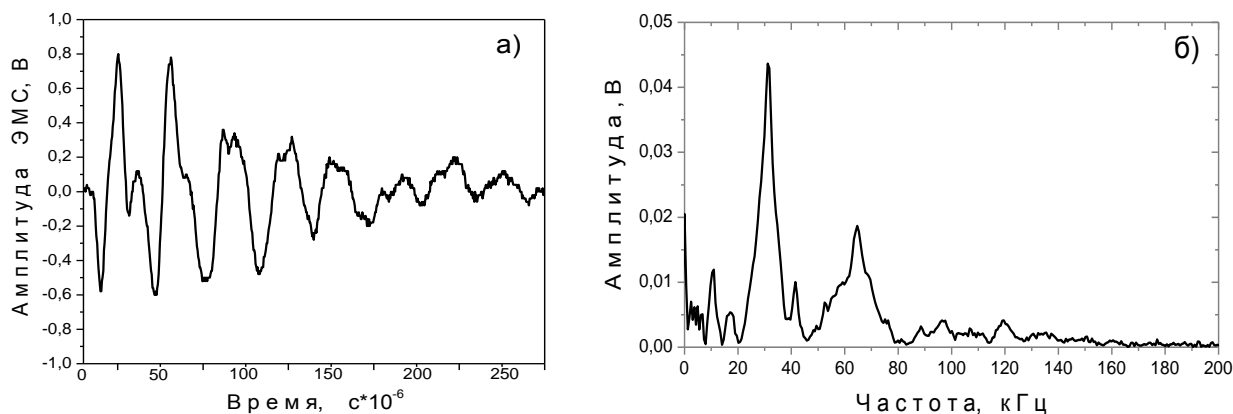


Рисунок 8 – Электромагнитный сигнал (а) и его амплитудно-частотный спектр (б) при пьезоакустическом возбуждении длительностью  $50 \cdot 10^{-6}$  с

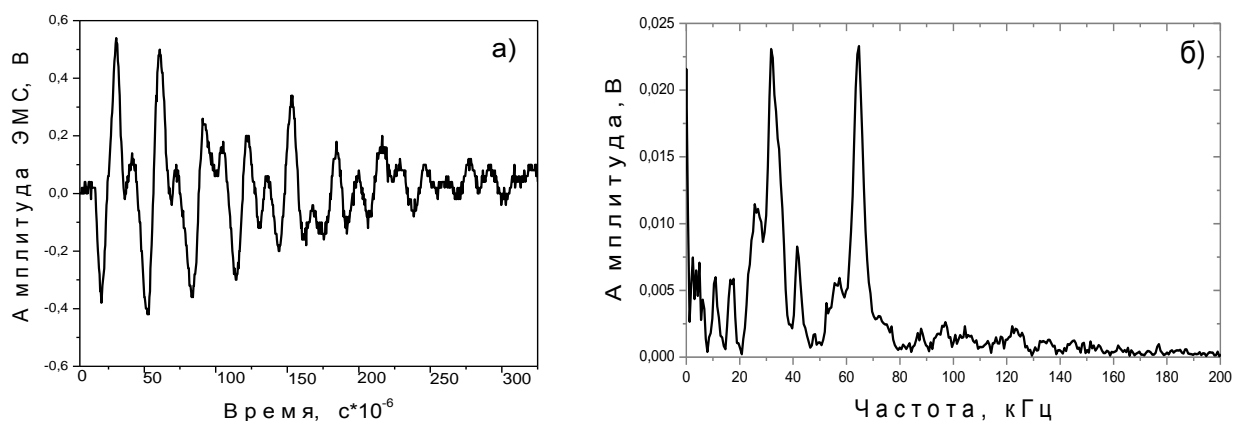


Рисунок 9 – Электромагнитный сигнал (а) и его амплитудно-частотный спектр (б) при пьезоакустическом возбуждении длительностью  $100 \cdot 10^{-6}$  с

Анализируя рисунки 6 (б), 7 (б), 8 (б) и 9 (б) видим, что в исходном состоянии амплитудно-частотные спектры (АЧС) электромагнитного сигнала ограничены частотой около 200 кГц. Во всем диапазоне изменения длительности акустического воздействия в амплитудно-частотных спектрах ЭМС выделяются четыре основные частотные полосы: 32 кГц, 41 кГц, 64 кГц, 120 кГц.

Вид регистрируемых ЭМС позволяет сделать вывод о том, что это затухающие колебательные процессы. При изменении длительности возбуждающего импульса наблюдается изменения формы аналогового

электромагнитного сигнала, а соответственно и его АЧС (Рис. 6 (а,б), 7 (а,б), 8 (а,б) и 9 (а,б)). Из рисунков также видно, что изменяется амплитуда выделенных частотных полос, закон убывания которых в дальнейшем будет представлен. На всех АЧС отчетливо выделяется частотная полоса около 32 кГц. Проведенные расчеты показали, что собственная резонансная частота образца серпентинита составила 33 кГц, что практически совпадает с частотой, определенной из эксперимента.

На рисунке 10 приведены зависимости изменения амплитуды частотной полосы 32 кГц ЭМС от длительности акустического импульса возбуждения для определенного количества слоев.

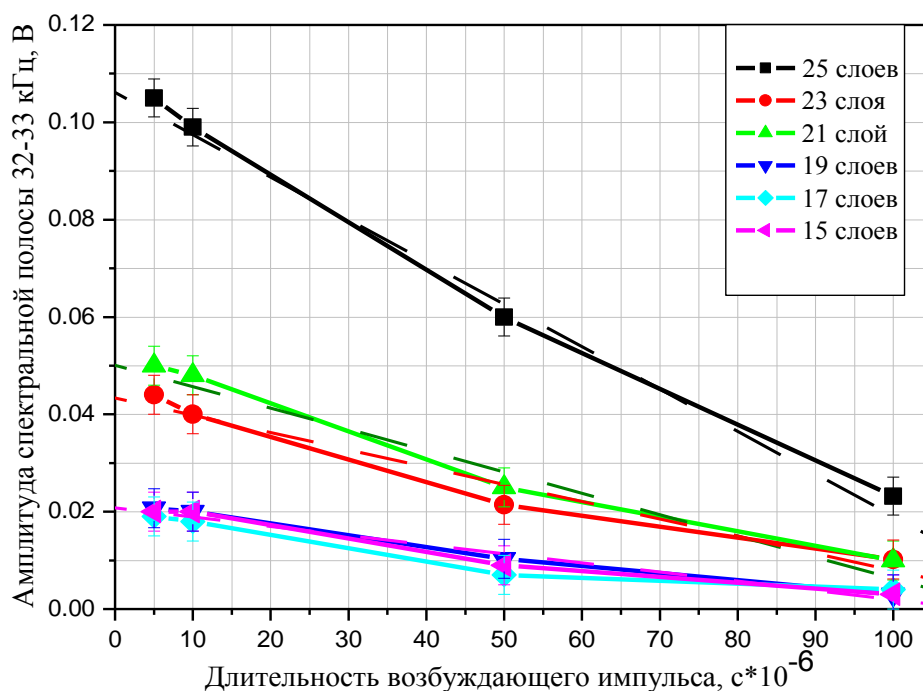


Рисунок 10 – Зависимость амплитуды ЭМС от длительности возбуждающего импульса для определенного количества двойных слоев хризотил-асбеста на частоте 32 кГц

Из рисунка видим, что увеличение длительности возбуждающего импульса приводит к уменьшению амплитуды частотных полос во всем частотном диапазоне по линейному закону.

На рисунке 11 представлены АЧС ЭМС при изменении размеров серпентинита, что соответствует уменьшению количества двойных электрических слоев.

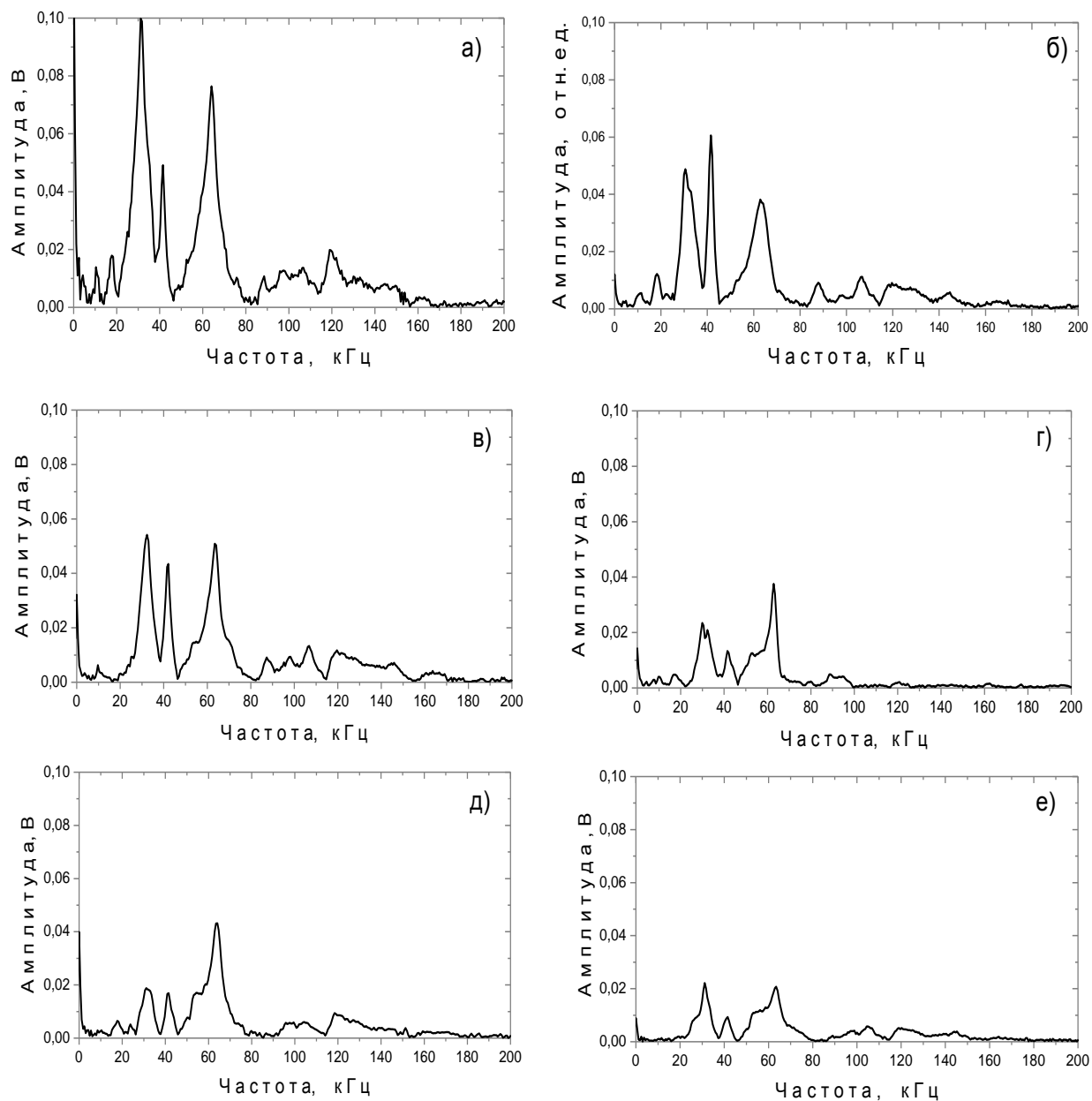


Рисунок 11 – Амплитудно-частотный спектр ЭМС образца серпентинита при длительности импульса возбуждения  $10^{-5}$  с и количестве слоев после частичного их удаления: а) 25 слоев; б) 23 слоя; в) 21 слой; г) 19 слоев; д) 17 слоев; е) 15 слоев хризотил-асбеста

Из рисунков видно, что при изменении размеров серпентинита и, соответственно, количества двойных электрических слоев происходит

изменение амплитуды основных частотных полос амплитудно-частотного спектра.

Зависимость изменения амплитуды спектральной составляющей электромагнитного сигнала на частоте 32 кГц, являющейся основной и присутствующей во всех амплитудно-частотных спектрах электромагнитного сигнала, от количества двойных электрических слоев показана на рисунке 12.

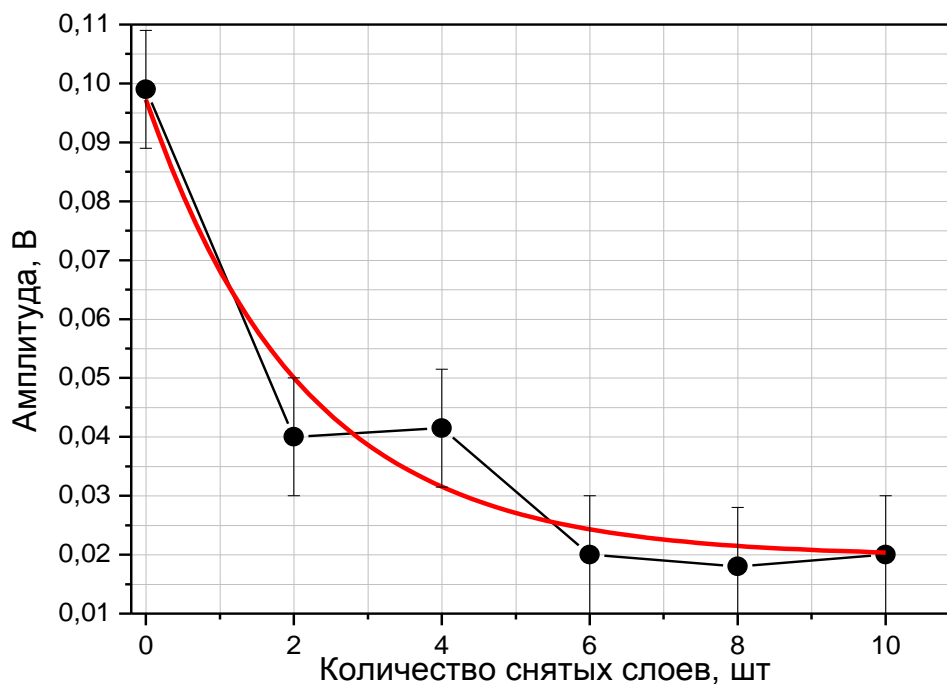


Рисунок 12 – Зависимость амплитуды ЭМС от количества снятых слоев хризотил-асбеста на частоте 32 кГц

Приведенная на рисунке 12 зависимость показала, что уменьшение количества слоев хризотил-асбеста, представляющих двойные электрические слои в серпентините, приводит к снижению амплитуды спектральной полосы ЭМС.

На рисунках 13 (а,б), 14 (а,б) и 15 (а,б) представлены электромагнитный сигнал и его амплитудно-частотный спектр при пьезовозбуждении образцов серпентинита в зависимости от напряжения электрического импульса, приложенного к ПАИ. Напряжение пьезоакустического возбуждения изменялось от 200-600 В при длительности  $5 \cdot 10^{-6}$  с.

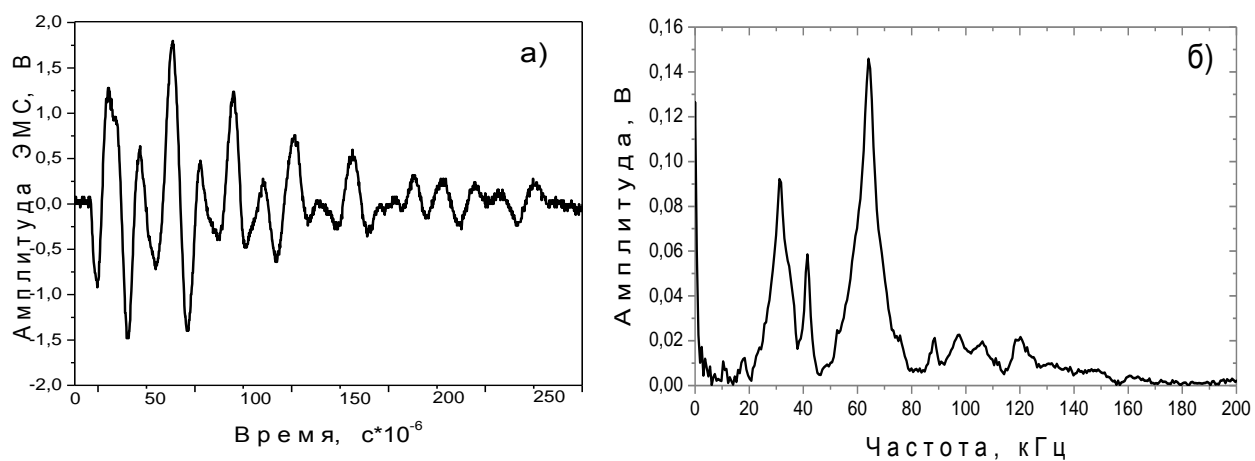


Рисунок 13 – ЭМС и его АЧС при пьезоакустическом возбуждении напряжением 200 В

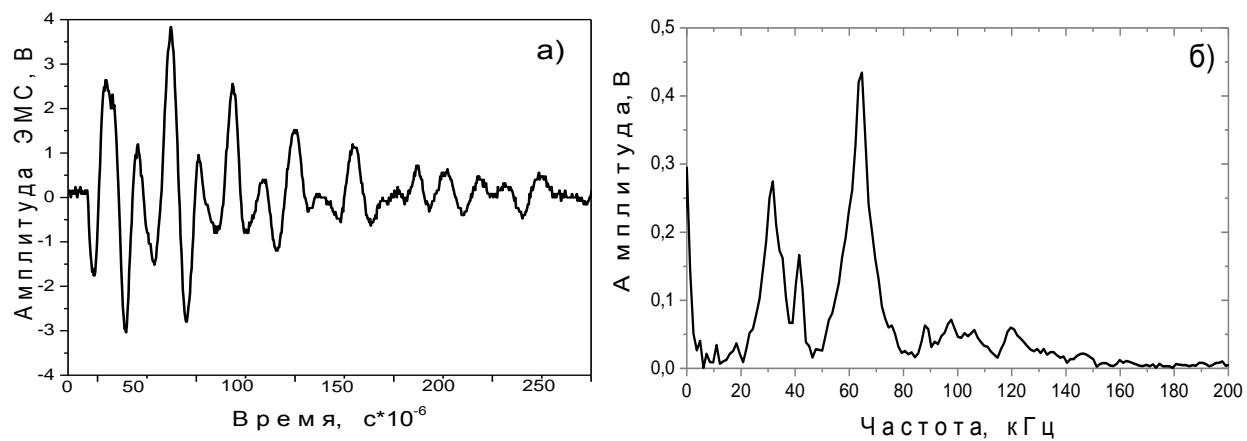


Рисунок 14 – ЭМС и его АЧС при пьезоакустическом возбуждении напряжением 400 В

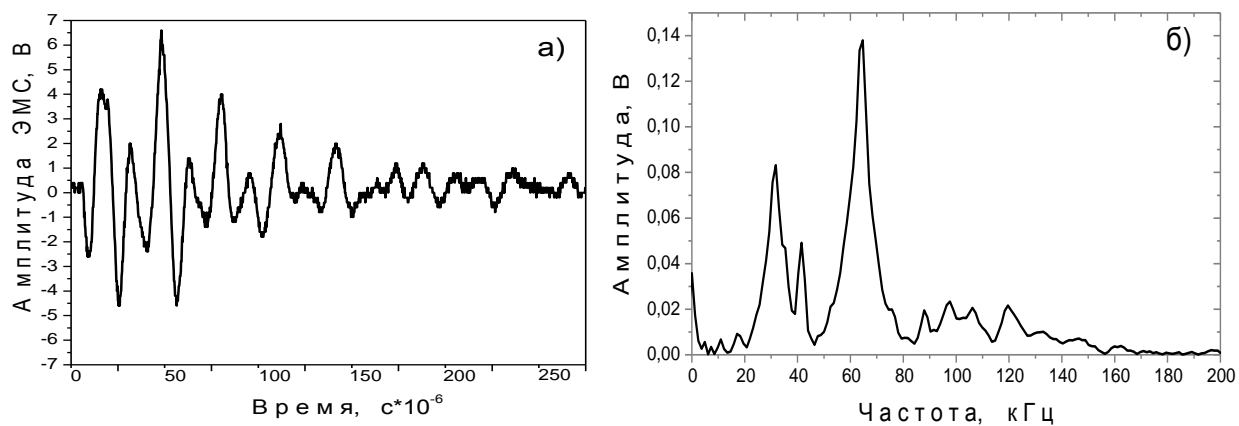


Рисунок 15 – ЭМС и его АЧС при пьезоакустическом возбуждении напряжением 600 В

На рисунке 16 представлены зависимости изменения спектральной амплитуды (32 кГц) ЭМС от количества двойных электрических слоев хризотил-асбеста при различных уровнях импульса напряжения на ПАИ. Исследования показали, что амплитуда акустического сигнала находится в зависимости от величины приложенного к ПАИ импульса напряжения. Поэтому эти графики можно рассматривать так же, как при различных уровнях акустического воздействия на образцы.

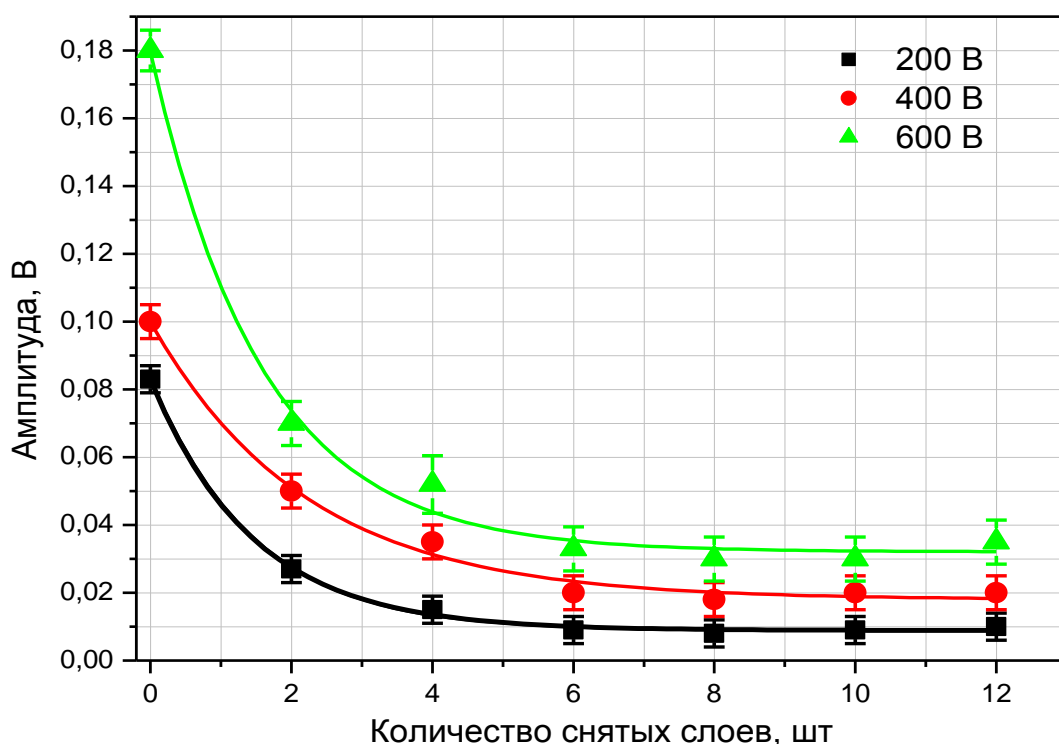


Рисунок 16 – Зависимости амплитуды ЭМС от количества слоев хризотил-асбеста на частоте 32 кГц при напряжении возбуждения 200 В, 400 В, 600 В

Из рисунка видно, что с увеличением импульса напряжения увеличивается амплитуда спектрально-частотных полос во всем частотном диапазоне.

При расположении оси электромагнитного датчика как вдоль так и поперек распространения акустического сигнала, исследования показали, что происходит изменение формы аналогового электромагнитного сигнала, а, следовательно, и его амплитудно-частотного спектра. На рисунке 17 (а,б)

приведены форма ЭМС и АЧС при разных ориентациях оси электромагнитного датчика.

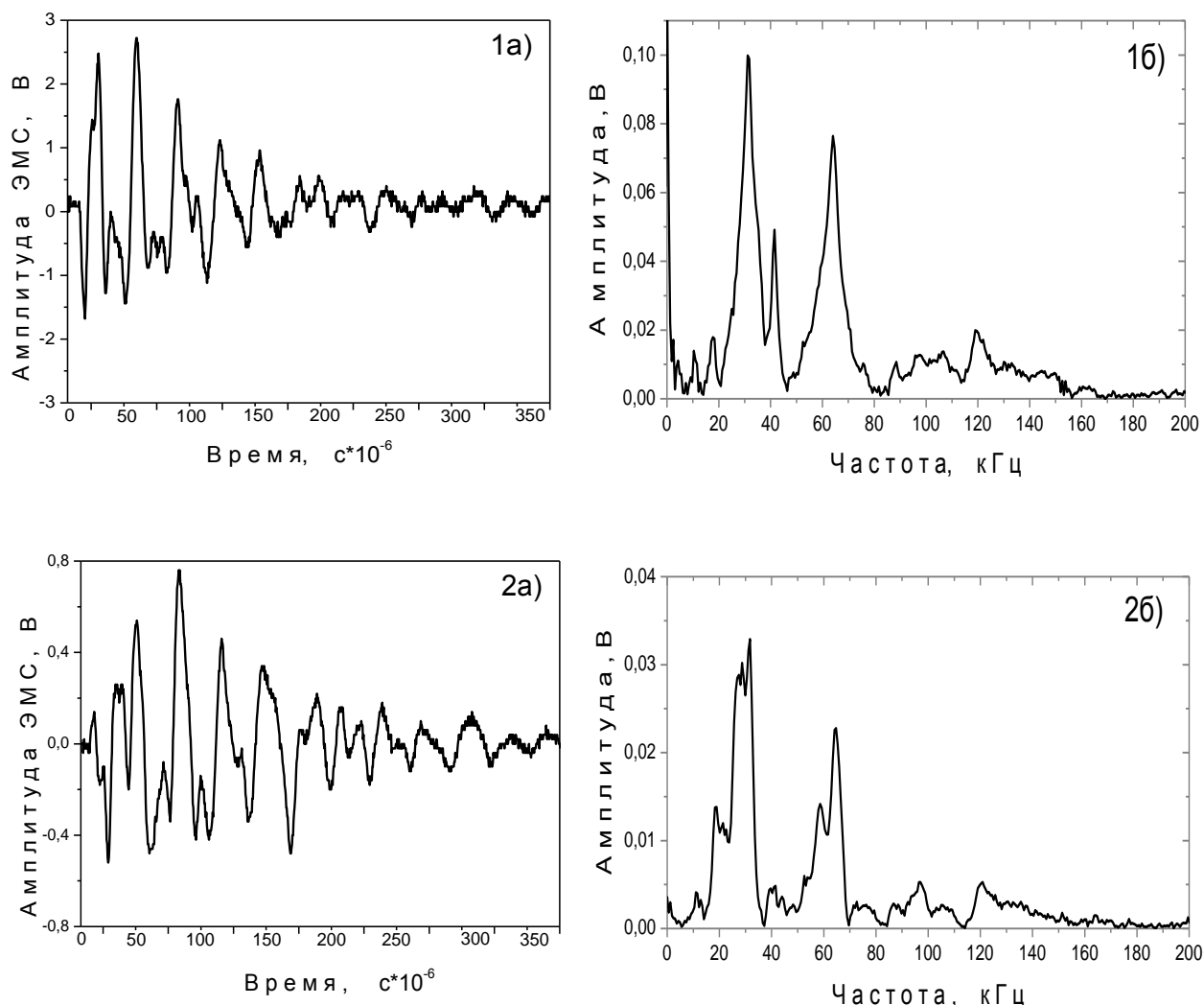


Рисунок 17 – Электромагнитный сигнал (а) и амплитудно-частотный спектр ЭМС (б) при электромагнитном датчике, ось которого расположена поперек направления распространения акустического сигнала (1) и вдоль направления (2) соответственно

Из рисунка 17 видно, что изменение положения оси электромагнитного дифференциального датчика относительно направления распространения акустического сигнала, приводит к изменению формы амплитудно-частотного спектра ЭМС и уменьшению амплитуды ЭМС, но основные частотные полосы в районе 32 и 64 кГц наблюдаются в обоих случаях. Это еще раз указывает на то, что основные частоты при акустическом возбуждении определяются размерами образца и скоростью прохождения акустического сигнала.

Зависимости амплитудно-частотного спектра ЭМС и величины размаха амплитуд начального уровня ЭМС от числа снятых слоев хризотил-асбеста, представленные на рисунках 18 и 19, показывают, что при данном расположении датчика также происходит снижение амплитуды, при уменьшении количества двойных электрических слоев по закону близкому к экспоненциальному.

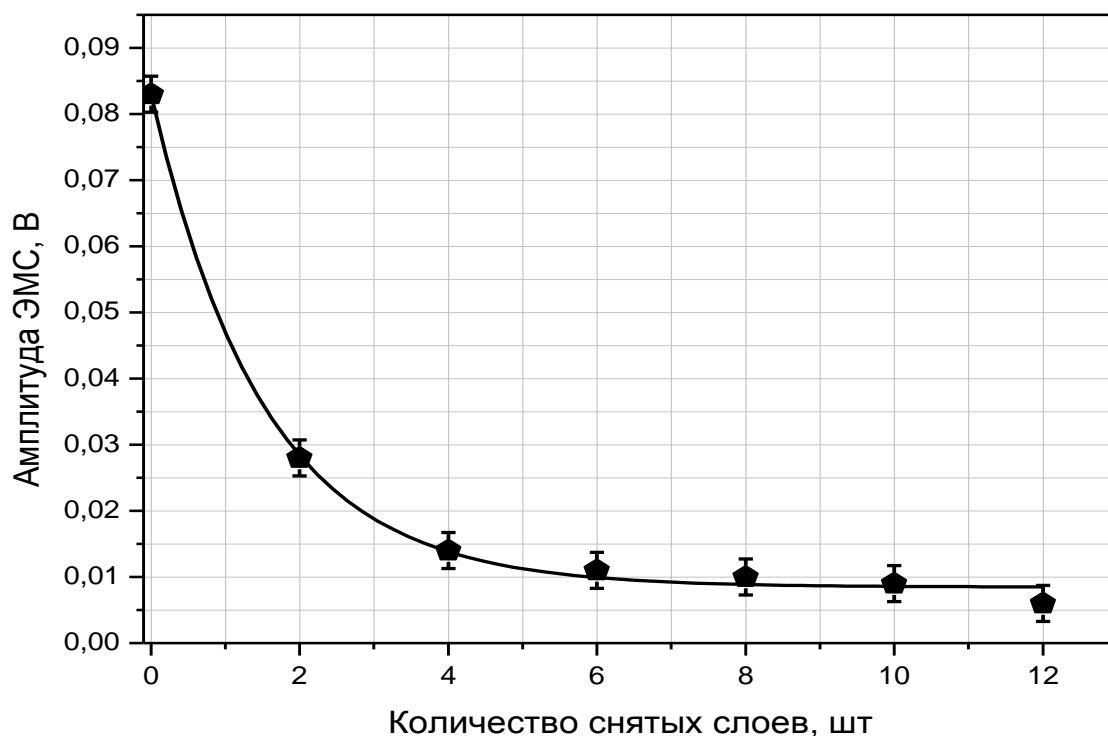


Рисунок 18 – Зависимость амплитудно-частотного спектра ЭМС от количества снятых слоев хризотил-асбеста при напряжении 200 В и длительности  $5 \cdot 10^{-6}$  с



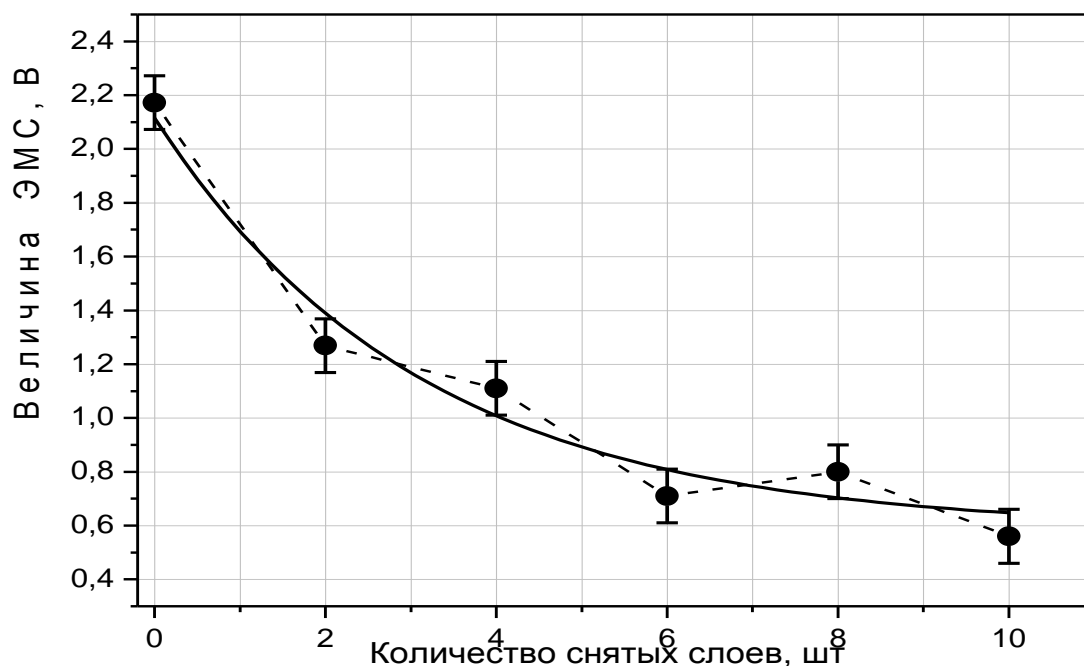


Рисунок 19 – Изменение максимального размаха ЭМС от числа снятых слоев хризотил-асбеста при длительности  $5 \cdot 10^{-6}$  с и напряжении возбуждения пьезоэлектрической керамики 200 В

Таким образом, выявлены зависимости амплитуды ЭМС и его частотных характеристик от количества двойных электрических слоев при пьезоакустическом возбуждении серпентинита.

### 3.2 Исследование параметров ЭМС при динамическом возбуждении образца серпентинита

Исследование параметров ЭМС при динамическом возбуждении образцов серпентинита проводилось с использованием стальных шариков двух размеров. Методика проведения экспериментов описана в главе 2.

На рисунке 20 представлены графики аналоговых электромагнитных сигналов образца серпентинита в исходном состоянии с размерами  $(6 \times 3,5 \times 2,4) \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup> при динамическом воздействии стальным шариком массой  $0,25 \cdot 10^{-3}$  и  $0,86 \cdot 10^{-3}$  кг.

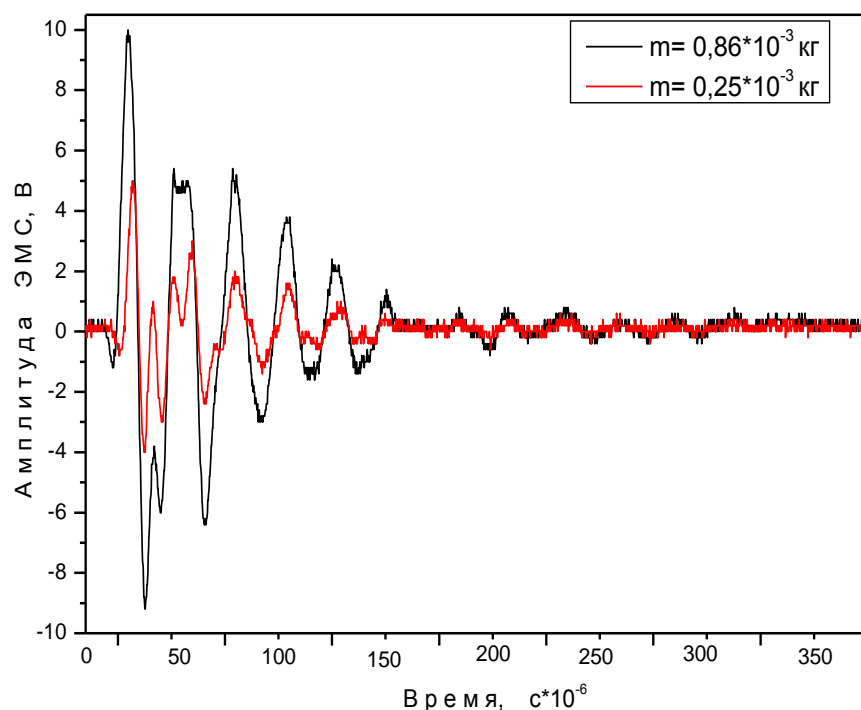
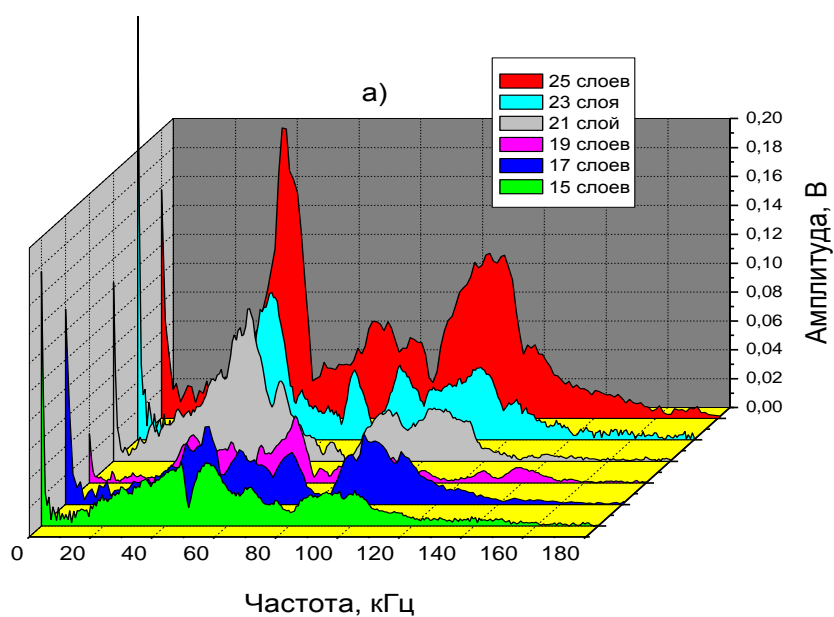


Рисунок 20 – Аналоговый электромагнитный сигнал образца серпентинита при динамическом воздействии стальным шариком массой  $0,25 \cdot 10^{-3}$  и  $0,86 \cdot 10^{-3}$  кг

Из рисунка видно, что при увеличении массы шарика амплитуда электромагнитного сигнала увеличивается примерно в два раза.

Ниже на рисунке 21 приведены амплитудно-частотные спектры при определенном количестве двойных электрических слоев для двух разных масс шарика.



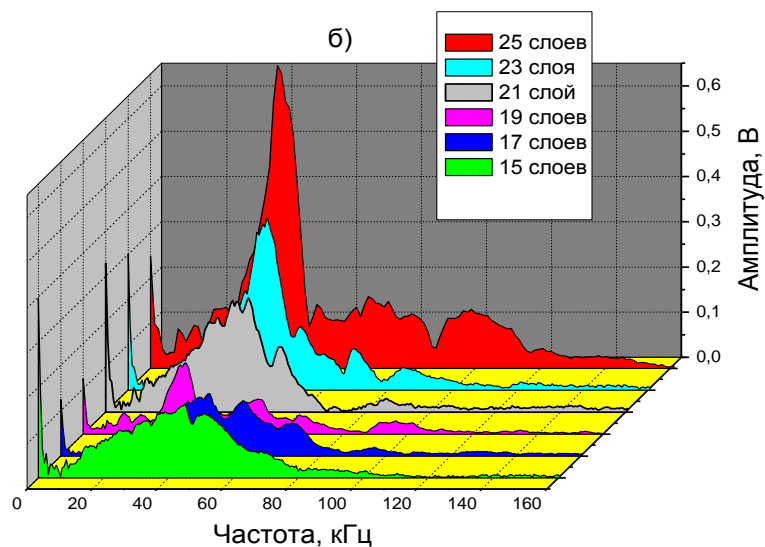


Рисунок 21 – Амплитудно-частотный спектр ЭМС образца серпентинита при последовательном снятии слоев хризотил-асбеста для массы шарика  $m = 0,25 \cdot 10^{-3}$  кг (а) и  $m = 0,86 \cdot 10^{-3}$  кг (б) соответственно

Видно, что при динамическом возбуждении уменьшение количества слоев хризотил-асбеста, представляющих двойные электрические слои в серпентините, приводит к снижению амплитуды спектральных полос ЭМС.

Таким образом, выявлены зависимости амплитуды ЭМС от количества двойных электрических слоев при динамическом воздействии на серпентинит.

### 3.3 Выводы по разделу

В результате проведенных исследований установлено что:

- вид регистрируемых электромагнитных сигналов соответствует затухающему колебательному процессу. Исходя из колебательного механизма возбуждения электромагнитного сигнала, спектральный состав ЭМС определяется линейными размерами образца, мощностью слоев и различием скоростей распространения акустического сигнала в них;
- при изменении размеров серпентинита и, соответственно, количества слоев происходит изменение амплитуды аналогового ЭМС и его основных частотных полос;
- уменьшение количества слоев хризотил-асбеста, представляющих двойные электрические слои в серпентините, приводит к снижению амплитуды частотных полос ЭМС;
- с увеличением импульса напряжения увеличивается амплитуда спектрально-частотных полос во всем частотном диапазоне;
- увеличение длительности возбуждающего импульса приводит к уменьшению амплитуды частотных полос во всем частотном диапазоне по линейному закону;
- на всех амплитудно-частотных спектрах ЭМС отчетливо выделяется частотная полоса около 32-36 кГц, свидетельствующая о единстве природы источников генерирования электромагнитного сигнала. Такими источниками при прохождении акустической волны могут быть колебания заряженных берегов микротрещин или колебания двойных электрических слоев.

## **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **4.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Для анализа потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка. В свою очередь, сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга). Можно применять географический, демографический, поведенческий и иные критерии сегментирования рынка потребителей, возможно применение их комбинаций с использованием таких характеристик, как возраст, пол, национальность, образование, любимые занятия, стиль жизни, социальная принадлежность, профессия, уровень дохода. В зависимости от категории потребителей (коммерческие организации, физические лица) необходимо использовать соответствующие критерии сегментирования.

Например, для коммерческих организаций критериями сегментирования могут быть: месторасположение; отрасль; выпускаемая продукция; размер и др. Из выявленных критериев целесообразно выбрать два наиболее значимых для рынка. На основании этих критериев строится карта сегментирования рынка.

В данной работе сегментировать рынок услуг по исследованию механоэлектрических преобразований в горных породах при изменении напряжённо-деформированного состояния можно по следующим критериям: размер компании и характеристики исполнительного органа (рисунок 22).

		Характеристики УДМ		
		маленькие габариты	высокая точность	большой ресурс
размер компании	крупные			
	средние			
	мелкие			

АО "НЦП ВостНИИ"  
НИЦ "Горный Эксперт"  
НИТУ "МИСисС"



Рисунок 22 – Карта сегментирования рынка услуг по разработке исполнительных органов

В приведенной карте сегментирования показано, какие ниши на рынке услуг по разработке исполнительных органов не заняты конкурентами. Из данной карты можно сделать вывод, что нет фирм мелких размеров и средних фирм, исполнительные органы которых имели бы маленькие габариты и большой ресурс работы.

Основными сегментами являются малые габариты исполнительного органа и высокая точность работы.

Данное предприятие будет ориентироваться на все три показателя.

## 4.2 Анализ конкурентных технических решений

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов. С этой целью может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;

- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Анализ проводится с помощью оценочной карты (табл. 1).

Для оценки были выбраны три фирмы-конкурента, которые были представлены на рис. 22.

Б<sub>к1</sub> - АО "НЦП ВостНИИ"

Б<sub>к2</sub> - НИЦ "Горный Эксперт"

Б<sub>к3</sub> - НИТУ "МИСиС"

Таблица 1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкурентоспособность			
		Бф	Бк1	Бк2	Бк3	Кф	Кк1	Кк2	Кк3
Технические критерии оценки ресурсоэффективности									
1. Повышение производительности труда пользователя	0.05	4	4	4	4	0.2	0.2	0.2	0.2
2.Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0.15	5	5	3	4	0.75	0.75	0.65	0.6
3. Помехоустойчивость	0.1	5	5	3	4	0.5	0.5	0.3	0.4
4. Энергоэкономичность	0.1	5	5	4	5	0.5	0.5	0.4	0.5
5. Надежность	0.1	4	4	3	4	0.5	0.5	0.3	0.4

Продолжение таблицы 1

6. Уровень шума	0.1	5	5	5	5	0.5	0.5	0.5	0.5
7. Безопасность	0.1	5	5	5	5	0.5	0.5	0.5	0.5
8. Потребность в ресурсах памяти	0.05	1	1	1	1	0.05	0.05	0.05	0.05
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.05	4	4	3	4	0.2	0.2	0.15	0.2
10. Простота эксплуатации	0.1	5	5	5	5	0.5	0.5	0.5	0.5
11. Качество интеллектуального интерфейса	0.05	5	5	3	4	0.25	0.25	0.15	0.2
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0.05	2	1	1	1	0.1	0.05	0.05	0.05
<b>Экономические критерии оценки эффективности</b>									
1. Конкурентоспособность продукта	0.2	5	5	3	4	1	1	0.7	0.8
2. Уровень проникновения на рынок	0.15	5	5	3	4	0.8	0.8	0.7	0.8
3. Цена	0.2	5	3	4	3	1	0.6	1	0.8
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0.1	4	4	3	3	0.5	0.5	0.3	0.4
5. Послепродажное обслуживание	0.1	4	4	3	3	0.4	0.5	0.3	0.4
6. Финансирование научной разработки	0.05	5	5	3	4	0.25	0.25	0.2	0.2
7. Срок выхода на рынок	0.1	5	5	3	4	0.5	0.5	0.4	0.4
8. Наличие сертификации разработки	0.1	4	4	3	3	0.5	0.5	0.4	0.4
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>37</b>	<b>36</b>	<b>25</b>	<b>28</b>	<b>4.95</b>	<b>4.55</b>	<b>3.9</b>	<b>4.1</b>

Критерии для сравнения и оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в табл. 1, подбираются, исходя из выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле 2:

$$K = \sum B_i \cdot B_i \quad (2)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Основываясь на знаниях о конкурентах, следует объяснить:



- чем обусловлена уязвимость позиции конкурентов и возможно занять свою нишу и увеличить определенную долю рынка;
- в чем конкурентное преимущество разработки.

Итогом данного анализа, действительно способным заинтересовать партнеров и инвесторов, может стать выработка конкурентных преимуществ, которые помогут создаваемому продукту завоевать доверие покупателей посредством предложения товаров, заметно отличающихся либо высоким уровнем качества при стандартном наборе определяющих его параметров, либо нестандартным набором свойств, интересующих покупателя.

### **4.3 Технология QuaD**

Технология QuaD (QQualityADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно- исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

1) Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность;
- правовая защищенность и др.

2) Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;

- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;
- уровень материалоемкости разработки и др.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации. Для упрощения процедуры проведения QuaD рекомендуется оценку проводить в табличной форме (табл. 2). В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по столбальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
<b>Показатели оценки качества разработки</b>					
1. Энергоэффективность	0.05	80	100	0.8	0.040
2. Помехоустойчивость	0.05	80	100	0.8	0.04
3. Надежность	0.05	80	100	0.8	0.04
4. Унифицированность	0.05	80	100	0.8	0.04
5. Уровень материалоемкости разработки	0.05	70	100	0.7	0.035
6. Уровень шума	0.05	60	100	0.6	0.03
7. Безопасность	0.05	80	100	0.8	0.04
8. Потребность в ресурсах памяти	0.05	50	100	0.5	0.025
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0.05	50	100	0.5	0.025
10. Простота эксплуатации	0.05	90	100	0.9	0.045
11. Качество интеллектуального интерфейса	0.05	80	100	0.8	0.04
12. Ремонтопригодность	0.05	90	100	0.9	0.045

Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13.Конкурентоспособность продукта	0.05	80	100	0.8	0.04
14.Уровень проникновения на рынок	0.05	50	100	0.5	0.025
15.Перспективность рынка	0.05	50	100	0.5	0.025
16.Цена	0.05	80	100	0.8	0.04
17.Послепродажное обслуживание	0.05	50	100	0.5	0.025
18.Финансовая эффективность	0.05	50	100	0.5	0.025
19.Срок выхода на рынок	0.05	50	100	0.5	0.025
20.Наличие сертификации разработки	0.05	50	100	0.5	0.025
<b>Итого</b>	<b>1</b>	<b>1050</b>	<b>2000</b>	<b>0.525</b>	<b>0.26</b>

Оценка качества и перспективности по технологии QuaD определяется по формуле 3:

$$П_{ср} = \sum B_i \cdot B_i \quad (3)$$

где  $П_{ср}$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя.

Значение  $П_{ср}$  позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. Если значение показателя  $П_{ср}$  получилось от 100 до 80, то такая разработка считается перспективной. Если от 79 до 60 – то перспективность выше среднего. Если от 69 до 40 – то перспективность средняя. Если от 39 до 20 – то перспективность ниже среднего. Если 19 и ниже – то перспективность крайне низкая. По результатам оценки качества и перспективности делается вывод об объемах инвестирования в текущую разработку и направлениях ее дальнейшего улучшения. Технология может использоваться при проведении различных маркетинговых исследований, существенно образом снижая их трудоемкость и повышая точность и достоверность результатов.

#### 4.4 SWOT-анализ

SWOT-анализ – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. Он проводится в несколько этапов.

Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта, в выявлении возможностей и угроз для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

1. Сильные стороны. Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей. При этом важно рассматривать сильные стороны и с точки зрения руководства проекта, и с точки зрения тех, кто в нем еще задействован. При этом рекомендуется задавать следующие вопросы:

- Какие технические преимущества вы имеете по сравнению с конкурентами?
- Что участники вашего проекта умеют делать лучше всех?
- Насколько ваш проект близок к завершению по сравнению с конкурентами?

2. Слабые стороны. Слабость – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами. Чтобы прояснить в каких аспектах вас, возможно, превосходят конкуренты, следует спросить:

- Что можно улучшить?

- Что делается плохо?
- Чего следует избегать?

3. Возможности. Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию. Формулирование возможностей проекта можно упростить, ответив на следующие вопросы:

- Какие возможности вы видите на рынке?
- В чем состоят благоприятные рыночные возможности?
- Какие интересные тенденции отмечены?
- Какие потребности, пожелания имеются у покупателя, но не удовлетворяются конкурентами?

4. Угроза. Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту. Для выявления угроз проекта рекомендуется ответить на следующие вопросы:

- Какие вы видите тенденции, которые могут уничтожить ваш научно-исследовательский проект или сделать его результаты устаревшими?
- Что делают конкуренты?
- Какие препятствия стоят перед вашим проектом (например, снижение бюджетного финансирования проекта, задержка финансирования проекта и т.п.)?
- Изменяются ли требуемые спецификации или стандарты на результаты научного исследования?

- Угрожает ли изменение технологии положению вашего проекта?
- Имеются ли у руководства проекта проблемы с материально-техническим обеспечением?

Результаты первого этапа SWOT-анализа представлены в табличной форме (табл. 3).

Таблица 3 – Матрица SWOT

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> <b>С1.</b> Экономичность и энергоэффективность технологии проектирования. <b>С2.</b> Экологичность технологии проектирования. <b>С3.</b> Более низкая стоимость производства по сравнению с другими технологиями. <b>С4.</b> Высокая точность <b>С5.</b> Малые габариты <b>С6.</b> Более большой ресурс работы <b>С7.</b> Наличие прототипа научной разработки	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> <b>Сл.1.</b> Дефицит квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. <b>Сл.2.</b> Отсутствие инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ. <b>Сл.3.</b> Дорогая стоимость оборудования для проведения испытания опытного образца. <b>Сл.4.</b> Большой срок поставок материалов и комплектующих. <b>Сл.5.</b> Отсутствие финансирования
<b>Возможности:</b> <b>В1.</b> Использование инновационной инфраструктуры ТПУ. <b>В2.</b> Использование инфраструктуры ОАО «НИИПП» г.Томск . <b>В3.</b> Появление дополнительного спроса на новый продукт. <b>В4.</b> Повышение характеристик прибора. <b>В5.</b> Понижение цены, низкая стоимость прибора по сравнению с конкурентами.		
<b>Угрозы:</b> <b>У1.</b> Отсутствие спроса на товары нового предприятия <b>У2.</b> Развитая конкуренция технологий производства <b>У3.</b> Отказ в финансировании или несвоевременное финансовое обеспечение <b>У4.</b> Быстрое развитие технологий в стране, вследствие чего данные исследования могут стать устаревшими.		

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

В рамках данного этапа необходимо построить интерактивную матрицу проекта. Ее использование помогает разобраться с различными комбинациями взаимосвязей областей матрицы SWOT. Возможно использование этой матрицы в качестве одной из основ для оценки вариантов стратегического выбора. Факторы помечаются либо знаком «+» (означает сильное соответствие сильных сторон возможностям), либо знаком «-» (что означает слабое соответствие); «0» – если есть сомнения в том, что поставить «+» или «-». Пример интерактивной матрицы проекта представлен в табл. 4.

Таблица 4 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта								
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	B1	+	+	+	+	+	+	-
	B2	+	0	+	+	+	+	-
	B3	+	+	-	+	+	+	-
	B4	+	-	-	+	-	+	+
	B5	-	-	+	-	-	-	-

Сильны коррелирующие стороны и возможности: B1 C1 C2 C3 C4 C5 C6; B2 C1 C3 C4 C5 C6; B3 C1 C2 C4 C5 C6; B4 C1 C4 C6 C7; B5 C2.

Возможности B1, B2, B3 и B5 коррелируют с одними и теми же сильными сторонами C1 и C3, отсюда можно сделать вывод об общей природе этих факторов.

В рамках третьего этапа была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, которая приведена в таблице 5.

Таблица 5 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</b> <b>C1.</b> Заявленная экономичность и энергоэффективность технологии. <b>C2.</b> Экологичность технологии. <b>C3.</b> Более низкая стоимость	<b>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</b> <b>Сл.1.</b> Дефицит квалифицированных кадров по работе с научной разработкой. <b>Сл.2.</b> Отсутствие
--	---	---

	<p>производства по сравнению с другими технологиями.</p> <p><b>С4.</b> Высокая чувствительность</p> <p><b>С5.</b> Малые габариты</p> <p><b>С6.</b> Более большой ресурс работы</p> <p><b>С7</b> Наличие прототипа научной разработки</p>	<p>инжиниринговой компании, способной построить производство под ключ.</p> <p><b>Сл.3.</b> Дорогая стоимость оборудования для проведения испытания опытного образца.</p> <p><b>Сл.4.</b> Большой срок поставок материалов и комплектующих.</p> <p><b>Сл.5.</b> Отсутствие финансирования</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p><b>В1.</b> Использование инновационной инфраструктуры ТПУ.</p> <p><b>В2.</b> Использование инфраструктуры ОАО «НИИПП» г.Томск .</p> <p><b>В3.</b> Появление дополнительного спроса на новый продукт.</p> <p><b>В4.</b> Повышение характеристик прибора.</p> <p><b>В5.</b> Понижение цены, низкая стоимость прибора по сравнению с конкурентами.</p>	<p>Из интерактивной матрицы можно сделать вывод о связи сильных сторон С1 и С3 с возможностями В1, В2, В3 и В5, что весьма логично. Низкая стоимость товара повлечет за собой спрос на продукт, а экономичность позволит изготавливать продукт с использованием инфраструктуры ТПУ и НИИПП.</p>	<p>При изготовлении продукта, при использовании инфраструктур ТПУ и НИИПП можно столкнуться с проблемой нехватки опытных кадров, а также прототипа научной разработки. Проблему с кадрами можно решить путем обучения уже имеющихся кадров. Вместо прототипа разработки можно провести необходимые работы и эксперименты с купленным аналогом.</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p><b>У1.</b> Отсутствие спроса на товары нового предприятия</p> <p><b>У2.</b> Развитая конкуренция технологий производства</p> <p><b>У3.</b> Отказ в финансировании или несвоевременное финансовое обеспечение</p> <p><b>У4.</b> Быстрое развитие технологий в стране, вследствие чего данные исследования могут стать устаревшими.</p>	<p>Во избежание отказа в финансировании, нужно доказать экономичность изготовления прибора, а также удостовериться в его спросе на рынке. Для борьбы с конкурентами нужно, чтобы продукт удовлетворял высоким требованиям качества, но при низкой цене.</p>	<p>Отсутствие финансирования приведет к тому, что не будет разработан прототип научной разработки. Но как было выше сказано, можно использовать аналог данного продукта, максимально схожего с характеристиками, полученными теоретическим путем, собственного продукта</p>

## 4.5 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта, который может быть представлен в виде линейного графика или диаграммы Ганта, представленной в таблице 6.



Таблица 6 – Диаграмма Ганта

Код работы	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал. дн.	Продолжительность выполнения работ											
				февраль			март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление ТЗ	Руководитель	5												
2	Изучение литературы по теме	Дипломник	25												
3	Поиск и подготовка образцов горной породы	Дипломник Руководитель	20												
															
4	Разработка блок-схемы	Дипломник Руководитель	15												
															
5	Проведение экспериментальных исследований	Дипломник Руководитель	30												
															
6	Обработка полученных данных на ПК	Руководитель, Дипломник	20												
															
7	Подготовка к демонстрации	Руководитель, Дипломник	10												
															



– Руководитель



– Дипломник

## 4.6 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования необходимо обеспечить полное и верное отражение различных видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, рассмотрим их.

### 1. Материальные затраты

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле 4:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расхи}, \quad (4)$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхи}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

В стоимость материальных затрат включают транспортные расходы (15-25% от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов).

Результаты по данной статье занесены в таблицу 7.

Таблица 7 – Расчет материальных затрат

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы (З <sub>м</sub> ), руб.
Бумага	лист	200	2	460
Картридж	шт.	1	1000	1150
Интернет	М/бит	1	350	402,5
Ручка	шт.	2	40	46

Дополнительная литература	шт.	2	400	920
Тетрадь	шт.	1	20	23
<b>Итого</b>				<b>3001,5</b>

## **2. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей**

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы.

Размер основной заработной платы устанавливается, исходя из численности исполнителей, трудоемкости и средней заработной платы за один рабочий день.

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot T_p, \quad (5)$$

где  $З_{осн}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_p$  – продолжительность работ (затраты труда), выполняемых работником, раб. дн.;

$З_{дн}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 6:

$$З_{дн} = \frac{З_m \cdot M}{F_d}, \quad (6)$$

где  $З_m$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года.

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб.дн.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_m = З_б \cdot (k_{пр} + k_d) \cdot k_p \quad (7)$$

где  $З_б$  – базовый оклад, р.;

$k_{пр}$  – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

$k_d$  – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

$k_p$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад  $Z_6$  определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т. д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Расчет основной заработной платы сведён в таблицу 8.

Таблица 8 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	$Z_6$ ,руб	$k_{пр}$	$k_d$	$k_p$	$Z_m$ ,руб	$Z_d$ ,руб	$T_p$ , мес.	$Z_{осн}$ ,руб.
Руководитель	23264,86	1,30	1,05	1,30	71074,15	2992,60	95	284296,59
Дипломник	11300,00	1,00	0,00	1,00	11300,00	393,04	115	45200,00

### ***3. Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала и отчисления на социальные нужды***

В статью дополнительной заработной платы включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением

государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} \quad (8)$$

где  $З_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, р.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплат;:

$З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, р.;

Статья отчисление на социальные нужды включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}); \quad (9)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и прочие).

В таблице 11 приведена форма заработной платы с учетом налоговых отчислений на социальные нужды.

Таблица 9 – Заработная плата работников

Заработная плата	Руководитель	Дипломник
Основная зарплата, р.	284296,59	45200
Дополнительная зарплата, р.	34115,59	0
Отчисление на социальные нужды, р.	95523,65	0
Итого по статье $C_{\text{зп}}$ , р.	459135,84	

#### 4. Прочие расходы

Под прочими расходами понимаются расходы на потребляемую электроэнергию. Для ТПУ цена за 1кВт·ч электроэнергии составляет 4,36 р. Тогда расход по данной статье определяется по следующей формуле:

$$C_{\text{пр}} = Ц_{\text{т}} \cdot t_{\text{ч}} \cdot T_{\text{д}} \cdot M \quad (10)$$

где  $C_T$  – тарифная цена за за 1кВт·ч электроэнергии;  
 $t_{\text{ч}}$  – число рабочих часов в 1 рабочем дне;  
 $T_{\text{д}}$  – число рабочих дней, в течении которых велись работы;  
 $M$  – потребляемая мощность.

$$C_{\text{пр}} = 4,36 \cdot 8 \cdot 115 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 216,38 \text{ р.} \quad (11)$$

### 5. Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 35 - 70 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации. Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}) \quad (12)$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

$$C_{\text{накл}} = 0,4 \cdot 363612,18 = 145444,87 \text{ р.} \quad (13)$$

### 6. Группировка затрат по статьям

Исходя из полученных данных произведена группировка затрат по статьям (таблица 10).

Таблица 10 – Группировка затрат по статьям

Статьи						
Материальн ые затраты	Основная зароботная плата	Дополнит ельная зароботна я плата	Отчисления на социальные нужды	Прочи е прямы е расход ы	Накладн ые расходы	Итого плановая себестоимо сть
3001,5	329496,589	34115,591	95523,654	216,38	145444,87	607798,584

Весь бюджет исследования составил 607798,58 рублей.

## 5 Социальная ответственность

Сущность выполняемой научно-исследовательской работы заключается в том, чтобы исследовать механоэлектрические преобразования в образцах горных пород под воздействием динамического воздействия. В дальнейшем данные исследования будут применены для разработки метода мониторинга напряженно-деформированного состояния массива горных пород и прогноза удароопасности.

Метод планируется применять в горнодобывающей промышленности, непосредственно в шахтах, находящихся в разработке.

### 5.1 Производственная безопасность

#### 5.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при проведении исследований

Таблица 8 - Опасные и вредные факторы при проведении исследований механоэлектрических преобразований в образцах горной породы

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1) помещение образца горной породы в экспериментальную установку при динамическом и акустическом воздействии;	1. Недостаточная освещенность рабочей зоны;	1. Острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхностях установки, инструментов и оборудования;	1.ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ 2. ГОСТ 12.2.003–91 ССБТ 3. СН 2.2.4/2.1.8.562–96 4. ГОСТ Р 55710-20135 5. СанПиН 2.2.4.1191–03
2) подключение датчиков к осциллографу;	2. Повышенный уровень электромагнитных излучений;	2. Электрический ток;	
3)подключение осциллографа к ПК;			
4) проведение экспериментов на гидравлическом прессе.	3. Повышенный уровень шума.	3. Движущиеся части прессы; разрушенные части образцов горной породы.	

## **5.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов**

### **5.2.1 Мероприятия по электробезопасности**

Основными причинами поражения электрическим током являются:

- удар электрическим током при использовании неисправных электроприборов;
- присоединение к незаизолированным частям электроустановки (контакты, провода, зажимы и т.д.);
- ошибочно поданное напряжение на рабочее место;
- появление напряжения на корпусе оборудования, которое в нормальных условиях не находится под напряжением.

Электробезопасность в лаборатории должна обеспечиваться следующими мероприятиями:

- для защиты от напряжения прикосновения все токоведущие части должны быть изолированы; запрещается использовать кабели и провода с поврежденной или потерявшей защитные свойства изоляцией; незаизолированные токоведущие части должны быть оборудованы защитными ограждениями или расположены в недоступном для прикосновения месте; запрещается пользоваться поврежденными розетками, распределительными коробками, рубильниками и другими электроустановочными приборами; устройство и эксплуатация временных электросетей не допускается;

- для защиты от поражения электрическим током путем возникновения потенциала на проводящих корпусах электроприборов необходимо наличие защитного заземления; согласно ПУЭ сопротивление заземляющего устройства в любое время года должно быть не более 4 Ом, при этом сечение заземляющей жилы должно быть не менее 4 мм<sup>2</sup> для медных проводников, не менее 6 мм<sup>2</sup> – для алюминиевых и не менее 20 мм<sup>2</sup> – для стальных;



- для защиты от токов короткого замыкания необходимо наличие быстродействующих устройств защиты; электрическая сеть должна иметь защиту от токов короткого замыкания, обеспечивающую по возможности наименьшее время отключения и требования селективности; в качестве аппаратов защиты должны применяться автоматические выключатели или предохранители.

При работе в лаборатории, с целью обеспечения электробезопасности, должны выполняться следующие требования:

- все узлы одного персонального компьютера и подключенное к нему периферийное оборудование должны питаться от одной фазы электросети;
- корпуса системного блока и внешних устройств должны быть заземлены радиально с одной общей точкой;
- для аварийного отключения компьютерного оборудования должен использоваться отдельный щит с автоматами защиты и общим рубильником;
- все соединения ПЭВМ и внешнего оборудования должны производиться при отключенном электропитании.

Каждому необходимо знать меры медицинской помощи при поражении электрическим током. В любом рабочем помещении необходимо иметь медицинскую аптечку для оказания первой медицинской помощи.

Поражение электрическим током чаще всего наступает при небрежном обращении с приборами, при неисправности электроустановок или при их повреждении.

Для освобождения пострадавшего от токоведущих частей необходимо использовать непроводящие материалы. Если после освобождения пострадавшего из-под напряжения он не дышит, или дыхание слабое, необходимо вызвать бригаду скорой медицинской помощи и оказать пострадавшему доврачебную медицинскую помощь:

- обеспечить доступ свежего воздуха (снять с пострадавшего стесняющую одежду, расстегнуть ворот);
- очистить дыхательные пути;

- приступить к искусственной вентиляции легких (искусственное дыхание);

- в случае необходимости приступить к непрямому массажу сердца.

Любой электроприбор должен быть немедленно обесточен в случае:

- возникновения угрозы жизни или здоровью человека;
- появления запаха, характерного для горячей изоляции или пластмассы;
- появления дыма или огня;
- появления искрения;
- обнаружения видимого повреждения силовых кабелей или коммутационных устройств.

### **5.2.2 Мероприятия по выполнению норм естественного и искусственного освещения**

В соответствии с СанПин 2.2.1/2.1.1.1278-03 в лабораториях: механических и радиоизмерительных электронных устройств средняя освещенность должна быть не менее 400 лк.

По СНиП 23-05-95\* (СП 52.13330.2011) при такой освещенности рекомендуются следующие источники света:

Люминисцентные лампы;

Металлогалогеновые лампы;

Натриевые газоразрядные лампы.

Согласно СНиП 23-05-95 при проведении исследований механоэлектрических преобразований в образцах горной породы проводятся зрительные работы, относящиеся к 3 разряду – высокая точность, наименьший размер объекта различения 0,3 – 0,5 мм, подразряд работы – в, контраст объекта различения с фоном – большой, характеристика фона – темный. Необходимо создать комбинированную освещенность 400 лк для указанной категории работ.

Значение показателя ослеплённости (Р) не более 20, а коэффициента пульсации (Кп) не более 15 %.

Коэффициент естественного освещения (КЕО) при верхнем или комбинированном освещении должен быть равен 3%, при боковом – 1,2%.

### **5.2.3 Мероприятия по борьбе с производственным шумом**

На рабочем месте шум возникает в основном из-за работы гидравлического пресса, а также незначительно при работе ламп импульсного нагрева, вентиляции персонального компьютера и при воздействии внешних факторов.

Шум неблагоприятно воздействует на организм человека, вызывает психические и физиологические нарушения, снижение слуха, работоспособности, создают предпосылки для общих и профессиональных заболеваний и производственного травматизма, а также происходит ослабление памяти, внимания, нарушение артериального давления и ритма сердца.

Согласно пункту 3.2.2 СанПиН 2.2.4.3359-16 нормативным эквивалентным уровнем звука на рабочих местах является  $L = 80$  дБ. Средний уровень шума, создаваемый компьютером, составляет 35 дБ, иными словами, шум, создаваемый работой компьютеров, по своим характеристикам удовлетворяет санитарным нормам, но прерывистый импульсный шум, создаваемый гидравлическим прессом, составляет порядка 75 дБ, что входит в установленные рамки до 80 дБ.

Для борьбы с шумом в помещениях должны проводиться мероприятия как технического, так и медицинского характера. Основными из них являются:

- устранение причины шума, т. е. замена шумящего оборудования, механизмов на более современное оборудование, которое менее шумное;
- изоляция источника шума от окружающей среды (применение глушителей, экранов, звукопоглощающих строительных материалов);
- применение рациональной планировки помещений;

- использование средств автоматики для управления и контроля технологическими производственными процессами;
- использование индивидуальных средств защиты (беруши, наушники);
- проведение периодических медицинских осмотров с прохождением аудиометрии;
- соблюдение режима труда и отдыха.

#### **5.2.4 Мероприятия по обеспечению электромагнитной безопасности**

Основными источниками электромагнитного излучения являются осциллограф, компьютер, источник питания электромагнитного датчика, а также гидравлический пресс. Минимальное влияние среди всех источников оказывает осциллограф и источник питания, т.к. приборы полностью экранированы материалом, имеющий низкое электросопротивление, который в свою очередь отражает вредное излучение.

Из за воздействия электромагнитных полей и излучений на человека могут возникнуть проблемы полностью со всем организмом, а особенно с нервной системы, так как она является самой чувствительной к электромагнитному воздействию. Также весьма негативна реакция иммунной системы на электромагнитные поля.

Согласно СанПиН 2.2/2.2.1340-временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ, составляют:

- напряженность электрического поля в диапазоне частот 5 Гц - 2кГц – 25 В/м;
- напряженность электрического поля в диапазоне частот 2 кГц - 400кГц – 2,5 В/м;
- плотность магнитного потока в диапазоне частот 5 Гц - 2кГц – 250 нТл;
- плотность магнитного потока в диапазоне частот 2 кГц - 400кГц – 25 нТл;

- электростатический потенциал экрана видеомонитора – 500 В.

Существует несколько основных мероприятий по защите от электромагнитных излучений на рабочем месте:

- экранирование источника излучения и рабочего места (активное и пассивное; источника электромагнитного излучения или же объекта защиты; комплексное экранирование);
  - установление безопасного расстояния;
  - уменьшение излучения от источника;
  - конструктивное совершенствование оборудования с целью снижения используемых уровней ЭМП, общей потребляемой и излучаемой мощности оборудования;
- поглощение или уменьшение образования зарядов статического электричества;
- применение средств индивидуальной защиты.

### **5.2.5 Мероприятия по обеспечению безопасности оборудования для работников**

Согласно ГОСТ 12.2.003-91 «производственное оборудование» должно обеспечивать безопасность работающих при монтаже (демонтаже), вводе в эксплуатацию и эксплуатации как в случае автономного использования, так и в составе технологических комплексов при соблюдении требований (условий, правил), предусмотренных эксплуатационной документацией.

Материалы конструкции производственного оборудования не должны оказывать опасное и вредное воздействие на организм человека на всех заданных режимах работы и предусмотренных условиях эксплуатации, а также создавать пожаровзрывоопасные ситуации.

Конструкция производственного оборудования должна исключать на всех предусмотренных режимах работы нагрузки на детали и сборочные

единицы, способные вызвать разрушения, представляющие опасность для работающих.

Если возможно возникновение нагрузок, приводящих к опасным для работающих разрушениям отдельных деталей или сборочных единиц, то производственное оборудование должно быть оснащено устройствами, предотвращающими возникновение разрушающих нагрузок, а такие детали и сборочные единицы должны быть ограждены или расположены так, чтобы их разрушающиеся части не создавали травмоопасных ситуаций.

Конструкция производственного оборудования и его отдельных частей должна исключать возможность их падения, опрокидывания и самопроизвольного смещения при всех предусмотренных условиях эксплуатации и монтажа (демонтажа). Если из-за формы производственного оборудования, распределения масс отдельных его частей и(или) условий монтажа (демонтажа) не может быть достигнута необходимая устойчивость, то должны быть предусмотрены средства и методы закрепления, о чем эксплуатационная документация должна содержать соответствующие требования.

В непосредственной близости от движущихся частей, находящихся вне поля видимости оператора, должны быть установлены органы управления аварийным остановом (торможением), если в опасной зоне, создаваемой движущимися частями, могут находиться работающие.

Конструкция зажимных, захватывающих, подъемных и загрузочных устройств или их приводов должна исключать возможность возникновения опасности при полном или частичном самопроизвольном прекращении подачи энергии, а также исключать самопроизвольное изменение состояния этих устройств при восстановлении подачи энергии.

Элементы конструкции производственного оборудования не должны иметь острых углов, кромок, заусенцев и поверхностей с неровностями, представляющих опасность травмирования работающих, если их наличие не

определяется функциональным назначением этих элементов. В последнем случае должны быть предусмотрены меры защиты работающих.

Перед началом выполнения работ должны быть проведены организационные мероприятия, важным из которых является проведение инструктажей для работников.

### **5.3 Экологическая безопасность**

#### **5.3.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду**

При проведении исследования влияние на окружающую среду будут оказывать отходы в виде разрушенных образцов горной породы и машинное масло, используемое в качестве контактного акустического слоя, которые будут негативно влиять на литосферу.

Объемы используемого масла составляют порядка 300 граммов. Отработанное масло необходимо переработать для дальнейшего использования. Возможные методы переработки:

- физическая (фильтрация масла);
- химическая (взаимодействие масла с химическими реагентами);
- физико-химическая (комплекс мер, соединяющий первый и второй методы).

Разрушенные образцы горной породы не имеют никаких вредных и опасных примесей и поэтому они подлежат захоронению на полигоне ТБО без дальнейшей переработки.

#### **5.3.2 Анализ «жизненного цикла» объекта исследования**

Жизненный цикл механоэлектрических преобразований в горных породах включает в себя следующие основные стадии:

1. *Предпроектная (начальная) стадия* включает анализ рынка, выбор объекта исследования, формирование стратегии проекта, инвестиционный анализ, оформление исходно-разрешительной документации, привлечение кредитных инвестиционных средств.

2. *Стадия проектирования* включает разработку структурной и функциональной схем, организацию финансирования, руководство проектированием.

3. *Стадия реализации* в ходе которой будет осуществляться полное исследование механоэлектрических преобразований в горных породах.

4. *Стадия эксплуатации* объекта предполагает применение данных исследований для разработки метода мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород и прогноза удароопасности.

### **5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды**

В качестве мероприятий по защите окружающей среды от негативного воздействия объекта исследования может служить переработка отработанного машинного масла, для предотвращения вредного влияния на литосферу.

## **5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при исследовании механоэлектрических преобразований в образцах горной породы**

К наиболее вероятным ЧС, которые может инициировать объект или которые могут возникнуть при исследовании объекта можно отнести электрическое замыкание и, как следствие, пожар. Основной причиной возникновения коротких замыканий является нарушение изоляции электрооборудования. Нарушение изоляции вызывается:



- перенапряжениями;
- старением изоляции;
- механическими повреждениями изоляции;
- неудовлетворительным уходом за оборудованием;
- неквалифицированными действиями обслуживающего персонала.

#### **5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС**

При обнаружении пожара или признаков горения (задымление, запах гари, повышение температуры и т.д.) каждый работник обязан:

- обесточить электроустановки;
- тушение пожара осуществлять имеющимися в лаборатории противопожарными средствами (кошмой, песком, огнетушителем);
- немедленно отключить питание и принять меры к тушению очага возгорания при помощи углекислотного или порошкового огнетушителя;
- немедленно сообщить об этом по телефону 01 в пожарную охрану (при этом необходимо назвать адрес объекта, место возникновения пожара, а также сообщить свою фамилию);
- сообщить руководителю лаборатории;
- принять по возможности меры по эвакуации людей, тушению пожара и сохранности материальных ценностей.

#### **5.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

К общей части нормативно-правовых основ охраны труда относится: Трудовой Кодекс Российской Федерации.

Контроль условий труда на предприятиях осуществляют специально созданные службы охраны труда совместно с комитетом профсоюзов. Данный контроль заключается в проверке состояния производственных условий для работающих, выявлении отклонений от требований безопасности, законодательства о труде, стандартов, правил и норм охраны труда, постановлений, директивных документов, а также проверке выполнения службами, подразделениями и отдельными группами своих обязанностей в области охраны труда. Этот контроль осуществляют должностные лица и специалисты, утвержденные приказом по административному подразделению. Ответственность за безопасность труда в первую очередь несет руководитель.

Службы охраны труда совместно с комитетами профсоюзов разрабатывают инструкции по безопасности труда для различных профессий с учетом специфики работы, а также проводят инструктажи и обучение всех работающих правилам безопасной работы.

#### **5.5.1 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Компоновка рабочей зоны – это комплекс мероприятий, обеспечивающих рациональный трудовой процесс и эффективное использование средств и предметов труда.

Рациональная организация рабочего места осуществляется с учетом требований производственной санитарии и требований ГОСТ «Системы стандартов безопасности труда» (ССБТ). При этом необходимо обеспечить: правильную планировку рабочего места и рациональное оснащение его соответствующим современным оборудованием и оргтехоснасткой; оптимальное пространственное расположение материальных средств производства и правильное его обслуживание, а также рациональную цветовую окраску оборудования и приспособлений и нормированное освещение.

Планировка рабочего места должна предусматривать:

а) возможность выполнения рациональных движений, необходимых для осуществления трудового процесса;

б) наиболее экономное использование производственных площадей и сокращение путей транспортировки материалов;

в) рациональное расположение оборудования и оснастки в соответствии с последовательностью технологического процесса, возможность экономных движений оператора для осуществления трудового процесса и его безопасность.

При разработке планировки должны быть учтены общие антропометрические и физиологические данные человека.

В соответствии с ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ рабочее место должно обеспечивать возможность удобного выполнения работ в положении сидя или стоя, или в положениях и сидя, и стоя. При выборе положения работающего необходимо учитывать:

- физическую тяжесть работ;
- размеры рабочей зоны и необходимость передвижения в ней работающего в процессе выполнения работ;
- технологические особенности процесса выполнения работ (требуемая точность действий, характер чередования по времени пассивного наблюдения и физических действий, необходимость ведения записей и др.).

Рабочее место при выполнении работ в положении сидя должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований по теме работы сделан литературный обзор по основным закономерностям электромагнитного сигнала при акустическом воздействии на горные породы. Из анализа литературы следует, что при акустическом воздействии на горные породы параметры ЭМС зависят от физических и петрографических свойств горных пород, а также от структурно-текстурного строения. В процессе возникновения ЭМС под действием акустической волны происходит преобразование механических колебаний в электромагнитные за счет изменения дипольного момента двойных электрических слоев на границе раздела разнородных материалов.

Освоены методики регистрации ЭМС при акустическом воздействии на образцы, включая динамическое возбуждение стальными шариками и пьезоакустическое воздействие. Освоена методика определения скорости звука в образцах.

Экспериментально установлено:

- вид регистрируемых электромагнитных сигналов соответствует затухающему колебательному процессу. Исходя из колебательного механизма возбуждения электромагнитного сигнала, спектральный состав ЭМС определяется линейными размерами образца, мощностью слоев и различием скоростей распространения акустического сигнала в них;
- при изменении размеров серпентинита и, соответственно, количества слоев происходит изменение амплитуды аналогового ЭМС и его основных частотных полос;
- уменьшение количества слоев хризотил-асбеста, представляющих двойные электрические слои в серпентините, приводит к снижению амплитуды частотных полос ЭМС;
- с увеличением импульса напряжения увеличивается амплитуда спектрально-частотных полос во всем частотном диапазоне;

- увеличение длительности возбуждающего импульса приводит к уменьшению амплитуды частотных полос во всем частотном диапазоне по линейному закону;

- на всех амплитудно-частотных спектрах ЭМС отчетливо выделяется частотная полоса около 32-36 кГц, свидетельствующая о единстве природы источников генерирования электромагнитного сигнала. Такими источниками при прохождении акустической волны могут быть колебания заряженных берегов микротрещин или колебания двойных электрических слоев.

Полученные экспериментальные результаты исследования параметров ЭМС при прохождении акустического сигнала через образцы горных пород слоистой текстуры в дальнейшем могут быть использованы при разработке методов контроля изменения напряженно-деформированного состояния горных пород по параметрам электромагнитной эмиссии.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Stepanov A.W. Uber den Mechanismus der plastischen Deformation // Zs. Phys. – 1933. – S. 81. № 5. – P. 560-563.
2. Stepanov A.W. // Phys. Zs. Sowjet Union. – 1933. – S. 80. № 4. – P. 609-611.
3. Stepanov A.W. // Phys. Zs. Sowjet Union. – 1934. – S. 82. № 5. – P. 750-758.
4. Fischbach D.B., Nowick A.S. Deformation – induced charge flow in NaCl crystals // Phys. Rev. – 1955. – S. 99. № 4. – P. 333-335.
5. Fischbach D.B., Nowick A.S. Creation of a Potential Difference across NaCl crystals by deformation // Phys. Rev. – 1955. – S. 98. № 5. – P. 302-304.
6. Воробьев А.А., Заводская Е.К., Сальников В.Н. Изменение электропроводности и радиоизлучение горных пород и минералов // ДАН. – 1975. – Т. 220. – №1. – С. 82-85.
7. Воллбрандт М., Хрусталеv Ю.А., Линке Э.И. и др. Генерирование электронов высоких энергий при разрушении твердых тел // Там же. – 1975. – Т. 225. – № 2. – С. 342-344.
8. Корнфельд М.Н. Электризация ионного кристалла при расщеплении // ФТ. – 1974. – Т. 16. – Вып. 11 – С. 3385-3387.
9. Кротова Н.А., Карасев В.В. Исследование электронной эмиссии при раскалывании твердых тел в вакууме // Докл. АН СССР. – 1953. – Т. 92. – № 3. – С. 607-610.
10. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // ДАН.- 1981.- Т. 256, №4.- С. 824-826.
11. Яковицкая Г. Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии / Российская академия наук // Сибирское отделение института горного дела. – 2008. – Новосибирск. – С. 13-14.

12. Хатиашвили Н. Г., Перельман М. Е. О радиоизлучении при хрупком разрушении диэлектриков // Доклады Академии наук СССР. – 1981. – Т. 256. – №4. – С. 824-826.
13. Хатиашвили Н. Г. Электромагнитное излучение ионных кристаллов, стимулированное акустической волной // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7. – Вып. 18. – С. 1128-1132.
14. Хатиашвили Н. Г., Перельман М. Е. Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы // Доклады Академии наук СССР / Геофизика. – 1982. – Т. 263. – №4. – С. 839-842.
15. Перельман М. Е., Хатиашвили Н. Г. Генерация электромагнитного излучения при колебаниях двойных электрических слоев и его проявления при землетрясениях // Док. АН СССР. Сер. Геофизика. – 1983. – С. 80-83.
16. Хатиашвили Н. Г., Джапаридзе Дж. И., Чагелишвили В. А. Электромагнитное излучение при изменении емкости двойного электрического слоя. Электрохимия. – 1984, Т. XX. – Вып. 10. – С. 1402.
17. Гохберг М.Б., Гуфельд И.А., Гершензон Н.И. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1985. – №1. – С. 72-87.
18. Егоров П.В., Корнейчиков В.П., Горелкин А.Ф. Метод бесконтактного прогноза динамических форм проявления горного давления // Шахтная геофизика и геология. Труды ВНИМИ. – 1978. – №110. – С. 35-39.
19. Воробьев А.А., Заводская Е.К. и др. // Сборн. Вопр. Геологии Сибири. – Томск, 1971.
20. Заверткин С.Д., Сальников В.Н., Арефьев К.П. Электромагнитная эмиссия при фазовых переходах в минералах и диэлектрических материалах. – Томск: ТПУ, 2010. – 398 с.
21. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 359 с.

22. Урусовская А.А. // Успехи физических наук, 1968. – Т. 86. – №1. – С. 39-60.
23. Головин Ю.И., Шибков А.А. Быстропротекающие процессы и динамика дислокаций в пластически деформируемых щелочно-галоидных кристаллах // ФТТ. – 1987. – Т. 28. – №1. – С. 34-41.
24. Финкель В.М., Тялин Ю.И., Колодин А.Н., Тялина Л.Н. Заражение берегов трещины и работа разрушения щелочно-галоидных кристаллов // ФТТ. – Т. 9. – №9. – С. 97-101.
25. Мирошниченко М.И., Куксенко В.С. Излучение импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках // ФТТ. – 1980. – Т. 22. – №5. – С. 24-28.
26. Гольд Р.М., Марков Г.П., Могила П.Г. и др. Электромагнитное излучение минералов и горных пород, подтвержденных механическому нагружению // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1975. – №7. – С. 109-111.
27. Воробьев А.А., Матов Ш.Р., Гордеев В.Ф. Электромагнитные поля деформируемых образцов кварцевой керамики // Том. политех. ин-т. – Томск, 1979. – 14 с. – Деп. В ВИНТИ 14.01.80, №1219-80.
28. Воробьев А.А., Заводская Е.К., Сальников В.Н. Изменение электропроводности и радиоизлучение горных пород и минералов // ДАН. – 1975. – т. 220, №1. – С. 82-85.
29. Воробьев А.А., Сальников В.Н. Наблюдения радиоволн и аномальные изменения электропроводности при нагревании образцов горных пород и минералов // ФТПРПИ. – 1976. – №5. – С. 3-15.
30. Арефьев К.П., Заверткин С.Д., Сальников В.Н. Термостимулирование электромагнитных явлений в кристаллах и гетерогенных материалах. – Томск: СТТ. – 2001. – 400 с.
31. Воробьев А.А., Дмитриевский В.С. и др. // Сборн. Вопросы геологии Сибири. – Томск, 1971.



32. Гохберг М.Б., Гуфельд И.А., Гершензон Н.И. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1985. – №1. – С. 72-87.
33. Матов Ш.Р., Гольд Р.М., Яворович Л.В. Влияние масштабного фактора на электромагнитную эмиссию / Томск. политех. институт.- Томск, 1987. - 12 с. - Деп. в ВИНТИ 19.11.87, № 8167.
34. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Оценивание длительности сигналов электромагнитного излучения при разрушении горных пород // ФТПРПИ. -1999. - №4. - С. 61 - 65.
35. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. – 232 с.
36. Яворович Л.В., Гольд Р.М., Ласуков В.В. Исследование амплитуды электромагнитного сигнала при ударном воздействии на образцы горных пород с различной пористостью // ФТПРПИ. -1999.- №6. - С. 23-28.
37. Воробьев А.А., Заводская Е.К., Сальников В.Н. Изменение электропроводности и радиоизлучения горных пород и минералов при физико-химических процессах в них // докл. АН СССР. - 1975. - .220, №1. - С. 82 – 85.
38. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В., Дацко Д.И. Влияние слоистости алевролита на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении образцов // ФТПРПИ. -2002. - №2. - С. 27-32.
39. Schols C.H. Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression // J. Geophys. Res.-1968. -Vol. 73.- P. 1417-1432.
40. Koltsov F.G., Ponomarev F.V., Salov B.G. et.al. Investigation of precursory stage and fracture development in the rock samples by complex geophysical methods // Acta Geophys. Pol. - 1984. -Vol. 32, №3. - P. 283-299.
41. Перельман М.Е., Хатиашвили Н.Г. Генерация электромагнитного излучения при колебаниях двойных электрических слоев и его проявления при землетрясениях // Докл. АН СССР. -1983. -Т.271, №1. -С. 3110 - 3113.

42. Кузнецов С.В. Совместная регистрация электромагнитных и сейсмoeлектрических сигналов // Геофизические способы контроля напряжений и деформаций. - Новосибирск: ин-т горн. дела СО АН СССР, 1985. - С. 31 - 34.
43. Ямщиков В.С., Шкуратник В.Д., Лыков К.Г. Измерение напряжений в массиве горных пород на основе эмиссионных эффектов памяти // ФТПРПИ. - 1990. - № 2. - С. 23 - 28.
44. Болотин Ю.И. О коэффициенте электроакустического излучения трещин нормального отрыва при разрушении горных пород // ФТПРПИ. - 1993. - № 5. - С. 44-46.
45. Теоретические предпосылки измерения развивающейся трещины с помощью акустической эмиссии / Болотин Ю.И., Грешников В.А., Дробот Ю.Б., Маслов Л.Н. // Измерительная техника. - 1974. - №12. - С. 34-37.
46. Болотин Ю.И., Грешников В.А., Дробот Ю.Б. и др. Анализ акустической эмиссии, вызванной ростом трещины в прямоугольной пластине // Измерительная техника. - 1975. - № 1. - С. 24-28.
47. Динамика трещин и электромагнитное излучение нагруженных горных пород / Иванов В.В., Егоров Н.В., Колпакова Л.А., Пимонов А.Г. // ФТПРПИ. - 1988. - № 5. - С. 28-33.
48. Электромагнитная эмиссия диэлектрических материалов при статическом и динамическом воздействии / Гордеев В.Ф., Малышков Ю.П., Чахлов В.Л и др. // ЖТФ. - 1994. - Т.64, вып. 4. - С. 57-67.
49. Егоров П.В., Иванов В.В., Колпакова Л.А. О некоторых закономерностях импульсного электромагнитного излучения щелочногалоидных кристаллов и горных пород // ФТПРПИ. - 1988. - № 1. - С. 67-70.
50. Иванов В.В., Егоров П.В., Пимонов А.Г. Статистическая теория эмиссионных процессов в нагруженных структурно-неоднородных горных породах и задача прогнозирования динамических явлений // ФТПРПИ.- 1990. - № 4. - С. 59 - 65.

51. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Яковицкая Г.Е. Об одной модели сигналов электромагнитного излучения нагруженных горных пород // ФТПРПИ. - 1996. - № 3. - С. 9 - 17.
52. Динариев О.Ю., Николаевский В.Н. Об электромагнитном отклике при распространении сейсмического сигнала во фрагментированном горном массиве// Физика Земли.- 1998.- № 12.- С. 45-49.
53. Гордеев В.Ф., Ласуков В.В. Физика электромагнитного эмиссионного метода контроля качества материалов и его перспективы.// Известия высших учебных заведений. Сер. Физика.- 2001.- № 7.- С. 84-91.
54. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В. Влияние электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии // ФТПРПИ. - 2003. - №4. - С. 22 - 28.
55. Беспалько А.А., Кузьминых Р.А., Люкшин Б.А., Уцын Г.Е., Яворович Л.В. Экспериментальное и теоретическое исследование электромагнитной эмиссии в неоднородных диэлектрических образцах // ФТПРПИ. - 2007. - №1. - С. 12 - 16.
56. Беспалько А.А., Кузьминых Р.А., Яворович Л.В. Механоэлектрические преобразования в кварце и кварцсодержащих горных породах в процессе акустического возбуждения // Известия высших учебных заведений. Сер. Физика. - 2006. - №7. - С. 82 - 87.
57. Опарин В.Н., Юшкин В.Ф., Акинин А.А., Балмашнова Е.Г. О новой шкале структурно-иерархических представлений как паспортной характеристике объектов геосреды // ФТПРПИ. - 1998. - №5. - С. 16 - 32.
58. Леб Л. Статическая электризация. - Л: Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
59. Хатиашвили Н.Г., Перельман М.Е. Генерация электромагнитного излучения при прохождении акустических волн через кристаллические диэлектрики и некоторые горные породы // Докл. АН СССР. -1982. - Т.263, №4. - С.839 - 842.

60. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В., Дацко Д.И. Влияние слоистости алевролита на параметры электромагнитного сигнала при акустическом возбуждении образцов // ФТПРПИ. – 2002. - №2. - С. 27 – 32.
61. Беспалько А.А., Гольд Р.М., Яворович Л.В. Влияние электризации кальцитов на параметры электромагнитных сигналов при импульсном акустическом воздействии // ФТПРПИ. - 2003. - №4. - С. 22 - 28.
62. Фурса Т.В., Хорсов Н.Н., Батулин Е.А. Источники акустоэлектрических преобразований в бетонах // ЖТФ.-1999. -Т.69. - вып. 10. – С. 14-18.
63. Фурса Т.В. Механоэлектрические преобразования на границе контакта компонентов в слоистых композиционных диэлектрических материалах // ФТПРПИ. - 2000. - № 6 . - С. 29 - 34.
64. Суржиков А.П., Фурса Т.В., Хорсов Н.Н. Математическая модель электрического отклика на акустическое возбуждение композиционных материалов // Изв. ТПУ.- 2005. - Т.208. № 7. - С. 6 - 9.
65. Справочник физических констант горных пород. / Под. ред. Кларка мл., М.: Мир, 1969. – 544 с.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Каргина Е.А., Яворович Л.В. Исследование механоэлектрических преобразований в горных породах при динамическом возбуждении // VII Международная научно-практическая конференция «Информационно – измерительная техника и технологии»: статья в сборнике трудов конференции, г., Томск: Изд-во ТГУ, 2016. – С. 122-124.

2. Каргина Е.А. Исследование и разработка методики оценки прочности диэлектрических материалов по параметрам электромагнитных сигналов / Е. А. Каргина ; науч. рук. Л. В. Яворович // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее: сборник научных трудов VI Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых, 9 -14 октября 2017 г., г. Томск. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – С. 97.

## Приложение А

Глава 6. Источники и механизмы генерирования электромагнитного сигнала

Chapter 6. Sources and mechanisms of electromagnetic signal generation

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ6Б	Каргина Елена Андреевна		

Консультант ИШФВП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
В.н.с. ИШФВП	Беспалько А. А.	к.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист ОИЯ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Игна О. Н.	к.п.н.		

## **6 Sources and mechanisms of electromagnetic signal generation**

Since research of dynamoelectric transformations, large quantity of works has been devoted to finding out sources and mechanisms of electromagnetic signal (EMS) generation. Two principally important questions can be marked out in this problem: 1). What processes lead to charge separation, forming electric dipole, being EMS source. 2). What mechanisms of dipole moment change result in EMS generation.

In 1933 A.V. Stepanov discovered and examined phenomenon of electrical charge occurrence in NaCl crystals at plastic yield in external electrical field absence. In his works [2-4], it was demonstrated that sign of appearing charge can be either positive or negative, that after load removal the charge disappears and reloading up to voltage above yield point generates again charge occurrence. He explained this phenomenon as crystal layers friction against internal inhomogeneity and process of micro-cracking.

Further studies of this phenomenon belong to Fischbach and Novik [5,6]. They studied electric charge occurrence at NaCl crystals shrinking and for the first time connected its appearance with charge dislocation movement.

Different methods of alkali halide crystals deformations have shown that charge generates at strained sections limits when external voltage corresponds to yield point, and charge sign and quantity depend on method, amount and speed of loading, temperature, concentration and type of impurity, material structure. Much research in substances electrification has shown that there is connection characterizing dielectric material charge state change depending on its deformation degree. Plastic deformation gives current step by a factor of  $10^{10}$  times in comparison with its value in the field of reversible deformation. Even more powerful changes of dielectric charge state accompany its splitting.

At the beginning of 70s at the Tomsk Polytechnical Institute under the guidance of professor Vorob'ev A.A., electromagnetic signals were detected for the first time in laboratory setting at mechanical impact on dielectric materials (EMS) [1-2] ([7]). The reason of EMS was supposed to be different types of energy flow to

electromagnetic. Since then works on research of phenomenon of dynamoelectric transformations in dielectric materials have begun, including geological materials. At that same time, hypothesis was proposed, according to which crack initiation and propagation should be followed by electromagnetic pulse output. These studies have pushed to research of EMR process electromagnetism. At present, about thirty hypothesis of EMR initiation are available. According to one of them, EMR pulses can appear as a result of electron emission from the edge of growing crack [8-10], due to irregular motion of charge mosaic faceplate along the edges of growing crack [11], upon breakdown of double electric layers coupling near break surface. At that, charges moving with the top of penetrating crack make the most substantial contribution to EMR. It is known that moving dislocations at deformation make the substantial contribution to EMR, for example, of alkali halide crystals [12].

In 1981, Khatiashvily N. G., Perelman M.E. [13] have also shown that cracks formation in solid body and gaps in liquids should be followed by electromagnetic radiation generation (EMR), substantial proportion of which is concentrated within the range of  $10^4 - 10^9$  Hz. Such effects of EMR generation can make contribution to radio-frequency emission occurring during earthquakes.

For finding out possibility of EMR generation by dislocations and cracks at elastic waves transmission through sample, studies were carried out [14], as a result of which it was defined that acoustic wave (of definite power), going through crystal without cracks, causes EMR generation at the same frequency. EMR capacity depends on density, length and time of charged dislocations existence, and also on orientation and distance of aerial wire relative to crystal.

EMR generation appears at charges movement regarding stationary medium (currents system), at periodic oscillations of dipole and other moments in media (piezoeffect) and at media parts movement with divided immobile charges. These mechanisms should be connected with cracks edges charging and dynamics of their movement [13].

Charges generation at cracks surface is usually connected with movement to it or newly forming defects or dislocations at it. Nevertheless, another mechanism of



charging is possible, resulting from occasional interatomic and interionic linkage breakages at crack growth, resulting in formation of charge mosaic at crack surface, namely, fluctuation charge. Charge mosaic appearance at cracks edges leads to EMR generation by means of charges relaxation currents emergence.

The second of considered mechanisms of EMR generation is connected with bonding of charged cracks' edges. Every crack section, at which charges were not able to relax, possesses electrostatic energy not depending, what is characteristic of fluctuation process, on section square. At crack edges bonding, this energy passes into EMR.

Experimental research of problem on these effects existence is reasonable to carry out at radiation noninterference, connected with structural defects movement, particularly, dislocations [13].

Khatiashvily N. G., Perelman M.E. [15] discussed in the article one more mechanism of EMR generation at earthquakes preproduction, during and after it (aftershock). As it is defined [16], at ultrasonic sound (US) of sufficient intensity passage through dielectric ionic crystal, EMR is generated in crystal at US frequency and frequency which is twice smaller. This effect can be explained by generation, release and oscillations of charged line dislocations in US field and at higher intensity, by ultrasound bonding and separation of fluctuation-charged edges of micro cracks [17]. Despite the fact that previously different reasons of EMR generation existed at ultrasonic wave passage through dielectric, in this work it is shown that EMR generation with sufficiently low frequency, proportional to US frequency, can result only from effects, connected with cracks and dislocations.

Thus, it is determined that charged dislocations fluctuations should result in EMR generation. Apparently, inverse effect should also exist: in alternating electromagnetic field charged dislocations, evolving into fluctuations, will emit acoustic vibrations at electromagnetic field frequency. Unlike piezoelectric, this effect should depend on sample history and have threshold nature.

Considering that geological material includes particles of different types of substances – dielectrics, electrical conductors, then at cracks formation and powerful

acoustic waves transmitting in geological material, practically all components included in these formations must make contribution to EMR generation.

In this piece of work [18], one more mechanism of EMS generation is discussed. In areas with earthquakes sources or through which sound streams pass in seismic activity processes, there are systems with separated charges, oscillations of which can be generated by EMR, - double electrical layers at the boundary of solid bodies' beads and electrolytes (including, water films) and contact difference area between solid bodies' boundaries. Evaluation of EMR intensity at oscillation compression of double layers was carried out in the work and it was demonstrated, that this effect can make sufficient contribution to EMR intensity at earthquakes. Received data experimentally prove availability of EMR generation effect at acoustic wave passage through media with double layers. It was indicated in the article that inverse effect should also exist: in alternating electric field electrostrictive phenomena should appear (in double layers and US generation in them).

It is said in this work [19] that change of double electrical layer (DEL) capacity, due to electrode potential change or organic substances adsorption on it at alternating current action results in electromagnetic radiation (EMR), captured by aerial wire, not connected with polarization cell.

In early works of Vorob'ev A.A., Gokhberg M. B., Egorov P.V. [20-22] and following works of Salnikov V.N., Zaverkin S.D., Arefiev K. P. [23] it is being noted that EMS initiation in dielectric materials is possible as a result of different physical processes course, including at their mechanical stimulation, heat, radiation, electrical field impact.

According to the opinion of many researchers, the condition for EMS generation is surfaces charging, forming as a result of defects mechanical effect or surface of studied material [24,25]. At crystals deformation and destruction, charging is caused by: ionic linkage disconnection at cracks movement in material; charged particles movement; adhesion; electrokinetic phenomena.

In the opinion of Golovin Y. A., Finkel V.M., Miroshnichenko M. I. [26-28], in alkali halide crystals EMS is registered within the range of  $10 \div 10^7$  Hz. EMS

generation is connected with two mechanisms: dislocations slide lines formation at early stages of microplasticity deforming [26] and cracks hop propagation [28]. The authors consider that only these two mechanisms are able to create fields, close by intensity to registered ones. [26].

Processes of electric moment change are interpreted in different ways. In the work of Gol'd R.M. [29], signal occurrence was explained by gas-discharge processes in cavities of developing micro-cracks. Gas-discharge mechanism realization is possible between local sections of micro-crack surface for which Paschen's law is fulfilled [30,31], expressing dependence of charge ignition potential on multiplication of gas pressure by gas-discharge gap. Perelman M.E. and Khatiasvily [30] have offered a variety of models, based on charge transmitting. They consider that signals can be characterized by change of capacity during charged surfaces of micro-cracks movement, besides, by accelerated development of charged mouth or side walls of micro-cracks, at that, signal range by their evaluation is  $1 \div 10^3$  MHz.

For the first time Vorob'ev A.A. and Salnikov V. N. observed EMS at heating of geological materials' and minerals' samples [32,33]. EMS appearance is connected in these works with discharging processes between micro-destructions surfaces charged up to high voltage potentials.

Results of EM energy measurements of geological materials' samples in conditions of their natural occurrence, conducted by Vorob'ev A.A., Salnikov V.N. and Dmitrievskiy [32,23,34,35], give evidence of possibility of discharges and EMS occurrence at geological materials contact point, quartz reefs of excessive fissuring.

Studies of minerals and geological materials charging at loads influence on them have shown that surfaces of cracks appearing at that are covered by electric charges of opposite signs. Maximum voltage area is created in the place of crack initiation. At achievement of definite potentials difference, discharge in gas crack or dielectric itself happens between equally charged surfaces. Accelerated charge movement along surfaces is accompanied by electromagnetic field formation [36].

Therefore, at change of strain-stress state of rock mass, continuous transformation of mechanical energy into electrical by geological material, its accumulation and following release by way of electromagnetic emission occur [36]. Electromagnetic emission is radiated by way of quickly successive pulse groups lasting  $10^{-7} - 10^{-3}$  s.

## **1.2 Possibility of evaluation of electromagnetic signal parameters**

Electromagnetic radiation phenomenon discovery, accompanying process of cracks formation in different materials, created prerequisites for development of research techniques of charged materials destruction, including geological materials, by their EMR. It is especially actual at monitoring of Earth interior stressed state and rock pumps prognosis. EMR's informative parameters usually include EMR pulses duration, their number, energy, amplitude, spectral content.

Mastov Sh. R., Gol'd R. M. and Yavorovich L. V. in their work [28], have carried out research, having shown that repetition rate of electromagnetic pulses and their amplitude magnitude at mechanical loading of geological material of different size change in the same way, as samples strength change at their sizes change.

In Kurlin M.V. studies [29], electromagnetic radiation signals duration at geological material destruction was evaluated by the example of marble. The results have shown that structure of synthesized algorithms of signal duration evaluation does not depend on unknown signal and noise parameters. The average signals duration, appearing at marble samples destruction is 20,6 m/s.

Physical prerequisites of geological material destruction prognosis based on electromagnetic radiation registration is the fact that before rock mass destruction in some time interval, relatively small by duration, large quantity of new micro-cracks appears in charged material and their following intergrowth. As far as cracks radiate signals of electromagnetic radiation with frequencies, inversely proportionate to their sizes, then at the moment of micro-cracks initiation EMR signal amplitude increase is observed, and its frequency is maximum. Comparing amplitude change of spectral density, maximum by time and frequency, it is possible to judge about

moment of micro-cracks initiation, namely about moment of rock mass destruction beginning. [30].

Based on experimental research results of EMS amplitude, in the work [31] it was ascertained that at acoustic excitation with impact device application, with porosity increase (structure characteristic of geological material) electromagnetic signal amplitude by exponential law is decreased. Electromagnetic signal parameters can change depending on other structural peculiarities of analyzed geological material: granularity, sizes and layering direction.

Therefore, it is possible to make conclusion that different types of mechanical influence on solid dielectrics, including geological material, result in mechanoelectrical transformations. The result of such mechanoelectrical transformations is electromagnetic signal (EMS) in radio-frequency bandwidth. It is determined that EMS intensity depends on strength, elasto-plastic properties and mechanical load rate. EMS amplitude, duration and repetition frequency change at different stages of samples deformation are also discovered. One of perspective ways of mechanical effect, allowing fulfilling quality control of dielectric materials by EMS parameters, is dynamic excitation.

## **6.1 Connection of acoustic emission and EMS**

In recent years, much attention has been paid to research of electromagnetic emission characteristics, being reaction for acoustic influence or acoustic emission.

During the process of mechanical effect on geological material, its deformation and destruction occur, accompanied by cracks formation and propagation [7]. At that, electromagnetic emission (EME) arises. Along with EME, acoustical emission (AE) initiation, developing with activity increase and reaching its maximum value during macrodestruction, is observed. Electromagnetic emission arises at charges displacement or dipole moment change on the phase boundary surface (inhomogeneity) or medium defects at impulse load supplement [8]. In the works [9-12], it is specified that AE signals, provoked by separate cracks, have damped oscillations form and are registered in frequency range from several hundred

Hertz to hundred Kilohertz. EME is also registered within the same frequencies range. In the studies of Khatiashvily N. G. [13], it is shown that there is connection between EME and AE. EMR generation source at dielectric materials destruction is elastic vibrations, arising in the process of cracks formation (acoustic emission). The authors explain this effect by generation, release and oscillations of charged line dislocations in ultrasonic field, which at acoustic wave passage through them make their contribution to EMS, and at greater ultrasound intensity – by bonding and separation of fluctuation-charged micro-cracks edges, irregular motion of which is responsible for EME. With ultrasound frequency growth, the level of radiation reduces. By this reason, the authors have conducted experiments at frequency of 20 kHz. Besides, in this work it was noted that EMS is registered at elastic wave passage through crystal with frequency  $\nu_a$ , in the spectrum of which the same frequency  $\nu_a$  prevails. Load increase on sample up to the first dislocations appearance causes EMS intensity increase by one and a half – two times at the same frequency  $\nu_a$ . Therefore, in the study it is determined that acoustic wave, passing through crystal without cracks, causes EMS generation at the same frequency.

In the work of Khatiashvily N. G. [14], it is shown that cracks in solid bodies and gaps formation in liquids is accompanied by electromagnetic radiation generation, the substantial proportion of which is concentrated within the range of  $10^4$ - $10^9$  Hz. Such effects of EMR generation can contribute to radio-frequency emission, occurring at earthquakes. EMR generation appears at charges movement regarding stationary medium (currents system), at periodic oscillations of dipole and other moments in media (piezoeffect) and at media parts movement with divided immobile charges.

In the work of Khatiashvily N. G. and Perelman M.E. [15], it is ascertained that EMR generation at ultrasound wave passage through dielectric can be caused by the following reasons:

1. Effects, connected with grating type (piezoeffect, electrostriction).
2. Effects, connected with electronic subsystem (acoustic-EMF).
3. Effects, connected with grating defects.

In the studies [15,16], it is also noted that EMR generation with sufficiently low frequency, proportionate to ultrasound frequency, can be caused only by effects, connected with cracks and dislocations. In alternating electromagnetic field charged dislocations, starting to oscillate, will radiate acoustic oscillations at electromagnetic field frequency. At cracks formation and powerful acoustic waves distribution in geological material, almost all components included into these materials, should contribute to EMR generation.

Experimental research of EME parameters change at uniaxial compression of different geological material samples carried out by Kuznetsov S. V. [17], has ascertained that electromagnetic pulses appear at strain, exceeding value  $(0,7 \div 0,8) \sigma_c$ . With further load increase, registered pulses frequencies decrease is happening: if emission initially appears within frequencies range  $(200 \text{ kHz} \div 1,5 \text{ MHz})$ , then with further strain growth emission the range will be different  $(20 \div 100) \text{ kHz}$ . At the moment of samples destruction, emission intensity is maximal in all frequencies, and amplitudes of low-frequency components prevail over the remainder spectrum part. Electromagnetic pulses duration changes from 0,1 m/s to 0,5 m/s.

According to the work of Yamshchikov V. S. [18], peculiarities of acoustic and electromagnetic emission generation by geological material samples in laboratory research allow receiving quantitative estimations of mechanical stress, acting in rock mass. Electromagnetic pulses appearance in this work is connected with charged dislocations movement under influence of deviator load.

In the work of Bolotin Y.I. [20], it is specified that theoretical research and experimental measurements of AE signals [21, 22], and EMS, conducted by Ivanov V.V. in [23] have shown identical character of pulses form. At medium continuity rupture formation, sharp increase of crack edges displacement value up to maximum value, takes place. This stage is characterized by maximum speed of vibrational displacement, and then crack deceleration, stabilization and damping take place. Similar data were received by way of measurement of listed electric field tension or relative difference of potentials from destruction growth time. Correlation of electromagnetic and acoustic radiation energies is described by formula

$m_0 = \delta_0^2 / \sigma_{kp} \cdot \varepsilon$  [20], where  $\delta_0$  is surface density of electrical charges;  $\sigma_{kp}$  is critical stress of cracks propagation, which depends on coefficient of elasticity, surface energy of cracks propagation, starting crack sizes and crack step size, and also on Poisson ratio;  $\varepsilon$  is dielectric conductivity. This correlation characterizes distribution of electro-resilient fields at cracks formation of normal fracture.

Results of Gordeev V. F. research [24], provokes interest for understanding of electromagnetic emission generation nature at quasi-static loading of inorganic glass, polyamide, multilayer adhesive constructions with cellular and honeycomb structure, fiberglass samples. As a result of carried out experimental research, the authors came to conclusion that the main mechanisms of electromagnetic emission are:

- stepwise emergence, division or relaxation of electrical charge at appearing crack latest surface of normal fracture;
- electrical charge between separate parts of material at its destruction;
- oscillating motion of charged surfaces forming at the moment of charged surfaces, fibers' ends, gaps' edges rupture under influence of acoustic oscillations in destruction acts.

Electromagnetic emission study, accompanying mechanical loading of geological material samples, allowed the authors of research [25 ,26], coming to the following conclusion, based on thermofluctuation character of micro-cracks initiation and propagation in loaded geological material samples, alkali halide crystals and on supposition that every act of micro-cracks “skip” at the stage of their diffused accumulation is accompanied by impulse electromagnetic signal (IEMS). IEMS impulses flux, appearing at geological material samples loading, alkali halide crystals, is Poisson distribution where average time of impulses expectation exponentially reduces at increase of mechanical load, influencing on sample.

In research of Vostretsov A.G., Yakovitskaya G.E. [27] at IEMS signal model development, appearing at cracks formation propagation in geological material and taking into consideration kinetics of cracks accumulation, forms of appearing electromagnetic signals, it is determined that the process of cracks formation should



be considered as homogeneous Poisson process, developing in four dimensions. Resulting IEMS signal can be considered as stationary filtered Poisson process.

Electromagnetic response of the medium use at seismic signal distribution in fragmented mountain range for observance of dynamic phenomena of processes in earth crust was offered in the work of Dinariev D. [32]. In it, quantitative theory of electromagnetic phenomena at seismic signals in medium with microstructure is built.

Theoretical justification of physics of electromagnetic emission method of dielectric materials quality control was given in the work of Lasukov V. V. [33]. Here it is shown that mechanical oscillations excitation by single normalized hit, leads to appearance of current displacement, which depends on dipole moment change speed and speed of elementary sources volume density change. Value, spatial structure of surface charges and amplitude of charges oscillations are defined by physicochemical properties of tested samples internal areas.

In the research of A.A. Bepalko, R.M. Gol'd and L.V. Yavorovich [35], it is shown, that EMS amplitude at acoustic excitation from macro-crystalline marble is higher than from fine-crystalline, which is defined by dipole moment value of structural elements.

Acoustic pulse passage through dielectric sample with extensive defect causes electromagnetic response, in the spectrum of which frequency bands are singled out, defined by sample and defect sizes. In the work [39], comparison of experimentally received data on electromagnetic response parameters change at acoustical action on heterogeneous dielectric samples with results of wave process numerical stimulation allowed to determine connection of boundary displacement speeds with electromagnetic signal amplitude.

In EMS spectrum at piezoacoustical excitation, spectral bands are always present, determined by inherent sample resonance frequency. This conclusion is significant for determination of gaging equipment frequency range, engineered and used in laboratory and natural conditions. It is determined experimentally in natural conditions that this range lies within interval from dozens hertz to hundred kilohertz. Based on the research in the work [40], it is connected, with greater probability, with

blocks sizes forming rock mass. Studies on evaluation of rock mass mosaic structure, carried out at Institute of Mining SB RAS under the direction of member-correspondent, Oparin V. N. [41], have shown that blocks sizes distribution is within interval of  $(2\div 100)$  sm. Using correlation for fundamental harmonic of frequencies  $f = V_3/2L$ , it is possible to make sure that blocks of such sizes will principally radiate EMS, namely in frequencies range, mentioned above.

Therefore, the connection of EMS parameters with characteristics of actuating acoustic signal is observed. This points to the fact that acoustic signals generated at cracks initiation and propagation, influence significantly on EMS frequency spectrum, including natural conditions. Amplitude and actuating acoustic signal duration, and distance from sensor, receiving electromagnetic signal, result in changes in amplitude-frequency EMS characteristics.

## **6.2 Background for research of double electrical layers in dielectric materials**

Electric charge occurrence at clay minerals surfaces, double electrical layer formation ensure significant change of mechanical properties of clay geological material at environmental conditions change. Mechanical properties of clay geological material change is connected with possibility of restructuring realization of adsorptive and diffusive layers of double electrical layer at injection of ions with greater valence into the solution, temperature change, disperse medium of other nature use and so on.

At adhesive surface of contact minerals, being part of geological material, in the absence of mechanical effect, electrical charges occurrence can also happen as a result of electron output functioning of contact minerals difference. In this case, current carriers passage from the surface of one mineral to the surface of another takes place, potentials contact difference occur [19].

In the studies [15, 34] it is shown, that oscillations of heterogeneity boundaries and different rocks and minerals contacts by acoustic waves in which double electrical layers form, are accompanied by electromagnetic emission.

Acoustic signals lead to dipole moments change of double electrical layers at heterogeneous substances contacts boundaries, and, as a result, to EMS excitation, parameters of which carry information about mechanical state of researched material [35].

In the work [36], electromagnetic signal parameters research results at acoustic influence on layered geological material, represented by serpentinite are presented. Electromagnetic signal from components, included into serpentinite (chrysotile-asbestos and serpentinite) is insignificant. However, serpentinite itself, produced by availability of multiple double electrical layers, at acoustic excitation leads to drastic EMS amplitude increase. It is defined, that in electromagnetic signal spectrum, maximum values appearance characterized by beating at close frequencies addition, is possible. Analysis of received data confirms resonance oscillation mechanism of electromagnetic signal occurrence at acoustic excitation of geological material samples, complex by structure.

In the studies of T. V. Fursa [37], determining role of double electrical layer of electromagnetic response from layered composite materials is ascertained. Effective charge density of double electrical layer at adhesive contact boundary of two-component system cement-gypsum, which turned to be about  $4 \cdot 10^{-9}$  kl/sm<sup>2</sup> is also evaluated.

In the work [38], it is ascertained that one of mechanoelectrical transformations mechanisms at impact excitation of layered composite materials is mechanism connected with alternate electromagnetic field generation, characterized by double electrical layer charges movement, located at the boundary of components in composite by acoustic excitation wave, relative to signal receiver at invariable configuration of double layer-signal receiver system.

### **6.3 Target assignment**

Electromagnetic emission is one of information channels, allowing evaluation of changes of rock mass deflected mode. Geological material mechanical properties change as a result of all-round tensions effect leads to appearance or activation of

electromagnetic signals sources. The studies have shown that electromagnetic energy radiation is multifactorial process, depending on geological material physical properties, genetic type and structural-texture peculiarities. As in the conditions of deflected mode change, the sources of electromagnetic emission can be double electrical layers oscillations, taking place under acoustic waves influence.

Therefore, based on carried out analysis of literature sources, the target to carry out laboratory research of EMS parameters change at piezo-acoustic excitation of geological material samples with stratified structure was assigned. The representative of such geological material is serpentinite. As far as double electrical layer charges oscillation serves as one of the sources of electromagnetic signal, the aim of this work is evaluation of double electrical layers quantity influence on EMS parameters.